

**Universitat  
Oberta  
de Catalunya**

---

**Máster en Ingeniería de Telecomunicación (UOC, URL)**

**Área de Sistemas de Comunicación**

**ANÁLISIS DE MÉTODOS PARA PROTECCIÓN DEL ENLACE  
FEEDER EN COMUNICACIONES POR SATÉLITE**

**Autor: María JOVE FLÓREZ**

**Tutor: Víctor MONZÓN BAEZA**

**Profesor responsable de la asignatura:**

**Carlos MONZO SÁNCHEZ**

**FECHA: Junio 2023**



Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 3.0 España de Creative Commons

Copyright © 2023 María Jove Flórez

Permission is granted to copy, distribute and/or modify this document under the terms of the GNU Free Documentation License, Version 1.3 or any later version published by the

**Ficha del trabajo final**

<b>Título del trabajo:</b>	Análisis de métodos para protección del enlace feeder en comunicaciones por satélite
<b>Nombre del autor/a:</b>	María Jove Flórez
<b>Nombre del Tutor/a de TF:</b>	Víctor Monzón Baeza
<b>Nombre del/de la PRA:</b>	Carlos Monzo Sánchez
<b>Fecha de entrega:</b>	06/2023
<b>Titulación o programa:</b>	Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación UOC-URL
<b>Area del Trabajo Final:</b>	Sistemas de Comunicación
<b>Idioma del trabajo:</b>	Castellano
<b>Palabras clave</b>	Enlace feeder, láser, regulación europea, técnicas de protección, diversidad del site, modulaciones ópticas, megaconstelaciones
<b>Resumen del Trabajo</b>	
<p>En los últimos años, la miniaturización de la electrónica, los cambios regulatorios y la aparición de numerosas plataformas de satélite para órbitas terrestres bajas (LEO) y muy bajas (VLEO) están transformando notablemente la industria espacial. El aumento de información procedente de satélites LEO y GEO (Satélites geoestacionarios) y de constelaciones de satélites, supone un reto en relación con el ancho de banda de las comunicaciones clásicas por radiofrecuencia, que pronto será demasiado bajo para satisfacer las necesidades de transferencia de datos.</p> <p>Las comunicaciones ópticas son una tecnología probada en la Tierra, donde las señales ópticas pueden ser protegidas de fuentes externas por el medio física por el que viajan. Sin embargo, entre las estaciones terrenas y los satélites, las señales ópticas se encuentran expuestas a interferencias por fenómenos atmosféricos o por el paso de aeronaves y similares. Los sistemas de comunicación óptica deben alcanzar una relación señal a ruido suficiente para mantener el enlace entre el transmisor y el receptor.</p> <p>En el presente proyecto se estudiarán las normas de regulación para los láser existentes en el espacio europeo y las técnicas existentes en la literatura para la protección del enlace feeder, que es sobre el que recaerá mayor tráfico. Se realizará una comparativa con los resultados obtenidos con el fin de analizar qué técnica es más adecuada para cada situación de bloqueo del enlace.</p>	

**Abstract**

In recent years, the miniaturization of electronics, regulatory changes, and the emergence of numerous satellite platforms for low Earth orbit (LEO) and very low Earth orbit (VLEO) have significantly transformed the space industry. The increasing amount of information from LEO and geostationary (GEO) satellites and satellite constellations poses a challenge in terms of the bandwidth of traditional radiofrequency communications, which will soon be insufficient to meet the data transfer needs.

Optical communications are a proven technology on Earth, where optical signals can be protected from external sources by the physical medium through which they travel. However, between ground stations and satellites, optical signals are exposed to interference from atmospheric phenomena or the passage of aircraft and similar objects. Optical communication systems must achieve a sufficient signal-to-noise ratio to maintain the link between the transmitter and the receiver.

In this project, the regulations governing lasers in the European space and the existing techniques in the literature for feeder link protection, which will carry the majority of the traffic, will be studied. A comparison will be made with the obtained results to analyze which technique is most suitable for each link blockage situation.

# Índice de contenido

Hoja 5 de 73

<b>Índice de contenido</b>	<b>5</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>6</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>7</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>9</b>
1.1. Contexto y justificación . . . . .	9
1.2. Objetivos . . . . .	10
1.3. Impacto en sostenibilidad, ético-social y de diversidad . . . . .	11
1.4. Enfoque y método seguido . . . . .	12
1.5. Planificación . . . . .	13
1.6. Breve resumen de los productos obtenidos . . . . .	13
1.7. Breve descripción de otros capítulos de la memoria . . . . .	14
<b>2. Estado del arte</b>	<b>15</b>
2.1. Historia de las comunicaciones por satélite . . . . .	15
2.2. Comunicaciones ópticas . . . . .	17
2.3. Sistema láser . . . . .	19
2.3.1. Definición, componentes y propiedades . . . . .	19
2.3.2. Regulación europea en emisión láser . . . . .	21
2.3.3. Unidades de medida de una exposición a radiación láser . . . . .	23
2.4. Enlace feeder basado en tecnología laser . . . . .	26
2.4.1. Características del feeder . . . . .	27
2.4.2. Interferencias en el canal feeder . . . . .	29
2.5. Protección del enlace feeder . . . . .	34
2.5.1. Diversidad . . . . .	35
2.5.2. Protocolos de restauración . . . . .	37
<b>3. Análisis de soluciones para la protección del enlace feeder</b>	<b>43</b>
3.1. Diversidad del site . . . . .	43
3.2. Protocolos y algoritmos de restauración y protección de enlaces . . . . .	46
3.3. Modulación . . . . .	49
<b>4. Análisis técnico</b>	<b>53</b>
4.1. Balance de enlace . . . . .	53
4.2. Modulaciones . . . . .	57
4.3. Diversidad . . . . .	59
4.4. Comparativa de técnicas de protección . . . . .	62
<b>5. Conclusiones</b>	<b>64</b>
5.1. Conclusiones . . . . .	64
5.2. Líneas futuras . . . . .	65
<b>Bibliografía</b>	<b>67</b>

# Índice de figuras

Hoja 6 de 73

1.1. Planificación del TFM. . . . .	13
2.1. Diagrama de un sistema de comunicación por satélite [1]. . . . .	16
2.2. Diagrama de un sistema de comunicacionrs ópticas [2]. . . . .	18
2.3. Espectro electromagnético. Longitudes de onda de algunos láseres conocidos.	19
2.4. Principios de láser [3]. . . . .	20
2.5. Diferencias entre la luz ordinaria y los rayos láser [3]. . . . .	20
2.6. Representación gráfica de la diferencia en las velocidades de datos entre las comunicaciones por radio (en la imagen, “RF beam”) y láser (“optical beam”). NASA. [4] . . . . .	26
2.7. Parámetros de transmisión previstos para un enlace de conexión óptico y el balance de potencia asociado [5] . . . . .	28
2.8. Parámetros de transmisión previstos para un enlace de conexión óptico y el balance de potencia asociado[6]. . . . .	29
2.9. Clasificación de las principales interferencias en el canal feeder. . . . .	30
2.10. Función de fase para diversos tipos de nubes [7]. . . . .	31
2.11. Clasificación de las técnicas de diversidad. . . . .	35
4.1. Representación geométrica de parámetros para enlace entre satélites y co- municación óptica de enlace ascendente/descendente[8]. . . . .	54
4.2. Potencia de las modulaciones OOK, PPM, DPPM,DPIM y DH-PIM para va- riando el parámetro M. . . . .	58
4.3. Presupuestos de enlace de haz para el enlace ascendente de la puerta de en- lace (banda Ka superior) para los tres sistemas considerados en [9]. . . . .	59
4.4. Esquemático de la Payload para el satélite HTS. . . . .	60

# Índice de tablas

Hoja 7 de 73

2.1. Servicios a los que da conexión el feeder link. . . . .	17
2.2. LED vs Láser. . . . .	18
2.3. Límites de emisión accesibles (LEAs) para una clase determinada. (Tablas I a IV de la Norma CEI-825-84) [10]. . . . .	25
2.4. Feeder link RF vs feeder link láser. . . . .	28
3.1. Adaptación de técnicas de diversidad del site para comunicaciones ópticas por satélite. . . . .	45
3.2. Resumen protocolos de restauración de enlace. . . . .	46
3.3. Modulaciones utilizadas en comunicaciones ópticas. . . . .	52
4.1. Bandas de frecuencia en comunicación satelital óptica. . . . .	53
4.2. Gateways necesarios para dar soporte a todos los beams de las contelaciones citadas asumiendo 12 canales de la payload [11][12][13] [9] . . . . .	61
4.3. Comparativa de las técnicas de protección analizadas para distintas interferencias. . . . .	62

### Acrónimos

ASON	Automatic Switched Optical Network
BER	Bit Error Rate
DH-PIM	Dual-Header Pulse Interval Modulation
DPIM	Differential Phase-Shift Keying with Intensity Modulation
DPPM	Double Pulse Position Modulation
PPM	Pulse Position Modulation
EMP	Exposición Máxima Permisible
GEO	Geostationary Earth Orbit
GMPLS	Generalized Multiprotocol Label Switching
GPS	Global Positioning System
GW	Gateway
HAPS	High Altitude Platform Station
IEC	International Electrotechnical Commission
IoT	Internet of Things
ISO	International Organization for Standardization
LED	Light-Emitting Diode
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LEA	Límite de Emisión Accesible
LEO	Low Earth Orbit
MEO	Medium Earth Orbit
MPLS	Multiprotocol Label Switching
NGSO	Non-Geostationary Satellite Systems
OFL	Optical Feeder Link
OOK	On-Off Keying
PSK	Phase Shift Keying
QoS	Quality of Service
RF	Radio Frequency
SNR	Signal-to-Noise Ratio
TT&C	Telemetry, Tracking, and Command
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
UNE	Una Norma Española
VLEO	Very Low Earth Orbit
VHT	Very High Throughput



# 1. Introducción

En los próximos años, se espera un aumento significativo en el número de satélites utilizados para proporcionar diversos servicios de telecomunicaciones, especialmente aquellos en órbita baja (Low Earth Orbit, LEO). Estos satélites permitirán expandir la conectividad y satisfacer la creciente demanda de ancho de banda en las comunicaciones vía satélite.

En este contexto, los estudios relacionados con los enlaces feeder ópticos se vuelven de gran importancia, ya que es donde se concentrará un mayor tráfico. La necesidad de aumentar los anchos de banda para transferir grandes volúmenes de datos hace que la investigación y desarrollo de las comunicaciones satelitales en estas bandas sean fundamentales.

La política espacial europea se enfrenta a nuevos desafíos y una competencia internacional en constante crecimiento. Para abordar estos desafíos, a finales de 2022, la Unión Europea presentó dos iniciativas clave. La primera es una propuesta de Reglamento sobre una conectividad espacial segura, que busca garantizar un acceso ininterrumpido a servicios de comunicación por satélite seguros y conexiones avanzadas, confiables y rápidas para ciudadanos y empresas europeas. La segunda es una comunicación conjunta sobre el enfoque de la UE en la gestión del tráfico espacial, que busca regular y coordinar el tráfico espacial para garantizar su seguridad y eficiencia.

Dado este contexto, es crucial analizar la regulación que rige en el espacio europeo y examinar y comparar diferentes métodos para proteger los enlaces ópticos de diversos fenómenos atmosféricos o de objetos que puedan causar su interrupción o deterioro. Este análisis ayudará a garantizar una conectividad segura para los servicios de comunicación por satélite en Europa, y permitirá abordar los desafíos y riesgos asociados con la creciente competencia y las condiciones espaciales variables.

## 1.1.- Contexto y justificación

El uso de enlaces de alimentación ópticos, también conocidos como feeder links ópticos, desempeña un papel fundamental en los sistemas satelitales de órbita terrestre baja (LEO). Estos enlaces proporcionan la conectividad necesaria entre los satélites LEO y las estaciones terrestres para el intercambio de datos y la transmisión que requerirán las nuevas necesidades en los servicios de telecomunicaciones, y será el enlace sobre el que podrá sufrir más congestión.

Los enlaces feeder experimentan interrupciones frecuentes debido a los bloqueos de nu-

bes, lo que los hace inadecuados para servicios de telecomunicaciones que requieren alta disponibilidad. Una solución prometedora para lograr la disponibilidad necesaria del enlace de alimentación óptica es la diversidad de gateways.

Estas soluciones requieren una distancia mínima de 300 km entre los GW. Por lo tanto, es poco probable que los GW estén lo suficientemente separados entre sí dentro de la cobertura de un solo satélite LEO para aprovechar la diversidad de site como una mitigación del bloqueo de nubes. Además, debido a la movilidad de los satélites, no es fácil mantener mapeos duraderos entre grupos de GW redundantes y los satélites LEO correspondientes. Por lo tanto, no podemos utilizar protocolos de diversidad de site diseñados para sistemas de satélites GEO. Por ello, se debe considerar la diversidad de rutas entre los GW terrestres y los satélites LEO en la constelación, en contraste con la diversidad del enlace feeder entre múltiples GW terrestres y un satélite GEO específico.

Otras técnicas sobre estudio son los mecanismos de protección y restauración de enlaces en protocolos de red terrestre como OTN/SONET/SDH, MPLS, Ethernet e IP. Se investigará y compararán los mecanismos de protección y restauración de enlaces para redes de constelaciones de satélites y su aplicación en enlaces ópticos.

## 1.2.- Objetivos

Los objetivos del proyecto serán los siguientes:

1. Análisis de las técnicas de diversidad y protección del enlace feeder: se pretende recopilar los estudios relacionados con las técnicas de diversidad y los protocolos de restauración de enlace, así como su aplicación en las comunicaciones ópticas satelitales, con el fin de analizar sus ventajas y desventajas.
  - a) Normativa europea en emisión láser
  - b) Características e interferencias del enlace feeder
  - c) Protección del enlace feeder
2. Simulaciones: se realizarán una serie de simulaciones para analizar la performance del láser y algunos casos prácticos para estudiar la diversidad del site.
  - a) Modulaciones para ópticas
  - b) Diversidad del site

### 1.3.- Impacto en sostenibilidad, ético-social y de diversidad

La competencia de compromiso ético y global (CCEG) está definida a nivel de Máster como:

“Actuar de manera honesta, ética, sostenible, socialmente responsable y respetuosa con los derechos humanos y la diversidad, tanto en la práctica académica como en la profesional, y diseñar soluciones para mejorar estas prácticas.” [14]

Se abordan tres grandes dimensiones: sostenibilidad, el comportamiento ético y responsabilidad social, la diversidad y los derechos humanos, que se alinean con los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible 2030, ONU), con los que la UOC está públicamente comprometida, como demuestra en sus trabajos finales [15, 16, 17].

Este trabajo está relacionado principalmente con el ODS 9 - Industry, innovation and infrastructure y el ODS 11 - Sustainable cities and communities.

Los avances tecnológicos están haciendo posible una democratización de los datos gracias a una producción de más bajo coste que permite ajustar los precios de los servicios y hacerlos accesibles para las pequeñas y medianas empresas, despertando el interés de nuevos inversores. Se aumenta la inversión en tecnología y el número de nuevos activos en el mercado.

La industria ahora ofrece nuevos factores como la utilización, la estandarización y un precio accesible. En el caso de los satélites, se utilizan estructuras modulares y estándares como el CubeSat, se acorta la vida de las misiones entre uno y dos años dependiendo de la órbita y se utilizan componentes estándares de mercado que normalmente se usan en otros muchos sistemas, como cámaras, antenas, baterías, etc. Todo ello hace que la fabricación y el montaje de los pequeños satélites sea más fácil y que los presupuestos de las misiones sean más bajos.

La Unión Europea plantea una serie de acciones para recuperar el liderazgo en el sector de acceso al espacio mediante el desarrollo de tecnologías que permitan explotar el potencial de las VLEO y el diseño de nuevos conceptos de naves espaciales:

- 1) Desarrollar capacidades industriales y tecnológicas para el sector del espacio.
- 2) Invertir en programas europeos para desarrollar nuevos conceptos de vehículos de acceso al espacio.

**Hoja 12 de 73**

3) Mejorar las pruebas, las demostraciones y la exploración para incrementar el nivel de desarrollo tecnológico.

4) Promover una cultura emprendedora y de riesgos.

5) Aprovechar la inversión privada para impulsar el desarrollo de las tecnologías espaciales de acceso al espacio, atraer talento, promover la colaboración entre empresas públicas y privadas, y financiar las pymes del New Space [18].

En relación al ODS 9, también afectaría al ODS 11 - Sustainable cities and communities, ya que los avances tecnológicos repercuten también en las ciudades, ayudando a mejorar el transporte y la conectividad, por ejemplo.

Como punto negativo, en los próximos años se prevé la proliferación de basura espacial, al aumentar significativamente el número de satélites en órbita.

Con relación al comportamiento ético y social, se podría relacionar con el ODS 8 - Decent work and economic growth, ya que ayuda al crecimiento económico y a la creación de puestos de trabajo, y con el ODS 16 - Peace, justice and strong institutions, con la creación de instituciones y programas para el impulso de estas tecnologías.

#### **1.4.- Enfoque y método seguido**

En un inicio se propuso realizar un algoritmo para la detección de aeronaves que rompieran el enlace óptico, pero ante los pocos meses disponibles y de que la necesidad del estudio de todo aquello que interfiere en el enlace es de gran relevancia, finalmente se decidió centrar en el análisis de diferentes técnicas para protegerlo y que sirvieran para aportar seguridad y disponibilidad al enlace feeder.

Se comenzará realizando una introducción sobre las comunicaciones por satélite y las comunicaciones ópticas para llegar al estudio del láser y de la normativa europea respecto a su emisión. A continuación, se realizará la búsqueda de los estudios relacionados con los enlaces feeder en GEO y LEO, y de sus características principales, para finalmente comparar los métodos existentes para su protección y restauración.

## 1.5.- Planificación

Los recursos necesarios en el presente trabajo serán:

- Documentación sobre comunicaciones vía satélite
- Documentación sobre comunicaciones ópticas
- Documentación sobre láser y normativa europea en comunicaciones por satélite y láser
- Estado del arte en relación al enlace feeder RF y óptico, en GEO y LEO, perturbaciones atmosféricas, etc.
- Matlab

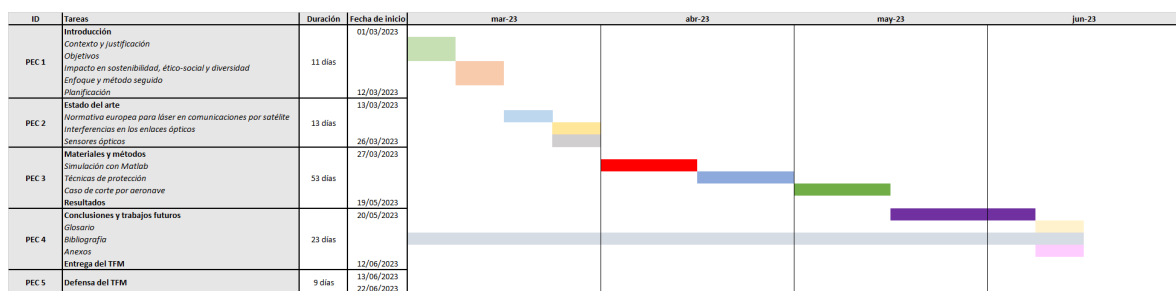


Figura 1.1: Planificación del TFM.

## 1.6.- Breve resumen de los productos obtenidos

El proyecto ha logrado aunar los distintos estudios existentes para mejorar la disponibilidad y confiabilidad de los enlaces de alimentación ópticos en sistemas satelitales. Se han recopilado las restricciones que rigen la emisión de láser en Europa y se ha analizado la diversidad del site para mitigar los bloqueos de nubes, buscando demostrar su eficacia en la protección del enlace feeder. Además, se han estudiado mecanismos de protección y restauración de enlaces que se pueden adaptar a las redes de constelaciones de satélites, para conseguir la reducción de interrupciones y la minimización del impacto de los bloqueos de nube. También se han investigado estrategias de enrutamiento y múltiples rutas simultáneas, demostrando su potencial para lograr una interrupción mínima en la transmisión de datos. Este recopilatorio y su comparativa representan una ayuda en la optimización y mejora de los enlaces de alimentación ópticos para sistemas satelitales LEO, brindando una base sólida para futuros desarrollos y aplicaciones en el campo de las telecomunicaciones por satélite.

## 1.7.- Breve descripción de otros capítulos de la memoria

A continuación, se realizará una descripción de los próximos apartados a tratar en la memoria del trabajo.

- **Capítulo 2 - Estado del arte:** En este apartado se realizará una revisión de la literatura existente y de los avances recientes en el campo del enlace feeder en los sistemas satelitales. Se analizarán los estudios y las soluciones propuestas por otros investigadores, identificando las fortalezas y limitaciones de cada enfoque.
- **Capítulo 3 - Análisis de soluciones para la protección del enlace feeder:** En esta sección, se examinarán y evaluarán diferentes soluciones de protección y restauración de enlaces para mitigar las interrupciones en los enlaces feeder y su adaptación a comunicaciones ópticas. Se analizarán los protocolos y mecanismos utilizados en las redes terrestres, así como las adaptaciones necesarias para su aplicación en sistemas satelitales LEO.
- **Capítulo 4- Análisis técnico:** Este apartado se centrará en el análisis técnico de las técnicas de modulación utilizadas comunicaciones ópticas, su simulación en Matlab y cómo pueden influir en la disponibilidad y rendimiento del enlace. Además, se simulará un escenario para estudiar el impacto de la diversidad site para la protección del enlace.
- **Capítulo 5 - Conclusiones:** En el capítulo final se resumirán los principales hallazgos y conclusiones derivados del trabajo realizado. Se presentarán las recomendaciones y posibles direcciones para futuras investigaciones en el campo de los enlaces feeder ópticos en sistemas satelitales.

## 2. Estado del arte

En esta sección se va a recopilar la información sobre la literatura existente que es objeto de estudio de este trabajo, desde el inicio de las comunicaciones por satélite, las comunicaciones ópticas y la importancia del enlace feeder.

### 2.1.- Historia de las comunicaciones por satélite

La historia de las comunicaciones por satélite se remonta a la década de 1950, cuando se comenzó a investigar la posibilidad de usar satélites artificiales para transmitir señales de radio [19]. En la década siguiente, los avances permitieron la transmisión de señales de televisión en directo a través del Océano Atlántico, lo que revolucionó la industria de los medios de comunicación. A partir de 1970, se lanzaron los primeros satélites de comunicaciones geostacionarios, que permanecían en una posición fija sobre la Tierra y permitían una comunicación continua con una gran área de la superficie terrestre [20]. Estos satélites se convirtieron en la columna vertebral de las redes de comunicaciones globales y permitieron la transmisión de voz, datos y vídeo a larga distancia.

En los años posteriores, se desarrollaron sistemas más avanzados para el procesamiento y transmisión de señales, con avances en la miniaturización de los componentes, el aumento de la capacidad de transmisión de datos y la mejora de la eficiencia energética. Esto dio lugar a la aparición de los nanosatélites, cuyo coste y plazos de fabricación hicieron que la tecnología espacial se volviera más accesible, impulsando a empresas como Google, SpaceX, OneWeb y Facebook a avanzar en su investigación. En 1999 se define el estándar CubeSat, nanosatélites con una estructura escalable en cubos de 10 cm de arista y de masa inferior a 1,33 kg, con bajo coste y bajo consumo de energía, que pueden combinarse para formar otros más complejos [21].

Hoy en día, los satélites de comunicaciones son una parte vital de la infraestructura global de las comunicaciones, utilizados para una amplia gama de aplicaciones, desde las telecomunicaciones y la transmisión de televisión hasta el seguimiento meteorológico y la navegación.

Además de los satélites GEO (Geostationary Earth Orbit) a 36.000 kilómetros de la superficie terrestre, existen satélites MEO (Medium Earth Orbit) entre 5.000 y 20.000 kilómetros, y sirven tradicionalmente para fines relacionados con la navegación, y LEO (Low Earth Orbit), que se encuentran a una altitud mucho más baja que los satélites en órbita geostacionaria, generalmente entre 200 y 2000 kilómetros sobre la Tierra. Cada satélite es visible

**Hoja 16 de 73**

desde la Tierra durante un corto espacio temporal. A causa de esto y de la poca altitud de estos satélites, es necesario utilizar grandes constelaciones para asegurar que el terminal terrestre se encuentre cubierto siempre por al menos un satélite. Las recientes innovaciones en el campo de los satélites no geostacionarios aumentan la popularidad de los sistemas NGSO, con costes de fabricación y lanzamiento económicos. En este contexto, la caracterización precisa del canal es crucial para el rendimiento optimización y diseño de comunicaciones eficientes, especialmente teniendo en cuenta el entorno de propagación dinámica, y se observa cierta divergencia en los modelos de canales considerados en la literatura, habiendo aún mucha parametrización de estos canales por resolver [22].

El concepto de megaconstelaciones de satélites comenzó a tomar forma en la década de 1990 [23] con el desarrollo del sistema de posicionamiento global (GPS) y la constelación de satélites Iridium, una red de 66 satélites lanzados en 1997 para proporcionar servicios de comunicaciones globales. Sin embargo, el interés en ellas ha aumentado significativamente en los últimos años debido a la mejora en la tecnología de satélites y la creciente demanda de servicios de comunicaciones en todo el mundo. En los años siguientes, empresas como SpaceX, OneWeb y Amazon comenzaron a trabajar en proyectos para lanzar grandes redes de satélites de comunicaciones para proporcionar servicios de comunicaciones, observación de la Tierra, navegación y otras aplicaciones [24].

Los sistemas de comunicación satelital cuentan con algunas limitaciones, como la latencia de la señal debido a la distancia que la señal debe recorrer desde la Tierra hasta el satélite y de regreso. Por lo tanto, en los LEO la latencia es menor que en los GEO y MEO. Por ello son utilizados para aplicaciones que requieren una mayor velocidad de transmisión, como el acceso a Internet de alta velocidad.

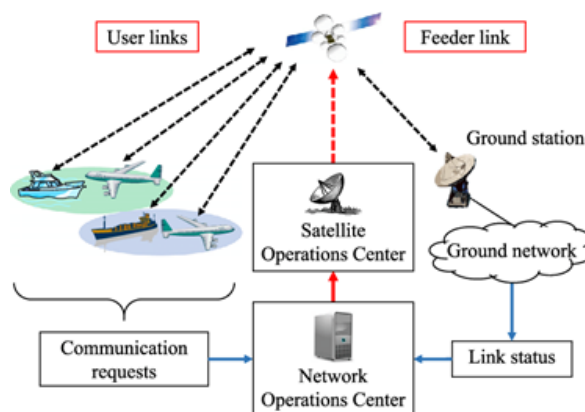


Figura 2.1: Diagrama de un sistema de comunicación por satélite [1].

En Figura 2.1 se muestra un diagrama de comunicaciones por satélite, en el que se observa que consta de tres componentes principales: el segmento espacial, el segmento terrestre y



los usuarios que utilizan el servicio. El segmento espacial y el terrestre se comunican entre sí mediante radioenlaces en sentido ascendente (uplink) y descendente (downlink). El segmento espacial está formado por los satélites en órbita, y el subsistema de comunicaciones (carga útil o payload). El segmento terrestre lo componen las estaciones de entrada o gateways, las estaciones hub o gateway y el subsistema de seguimiento, telemetría y telemando (TT&C).

Los gateway son las estaciones terrenas encargadas de encaminar el tráfico de la red por satélite, interconectando a los distintos usuarios del servicio. Además, los proveedores de servicios las usan para la difusión de contenido. Por otro lado, interconectan la red de satélites con otras redes terrenas.

En enlace que comunica los satélites con los gateway se denomina feeder link, dando acceso a gran cantidad de servicios. En la Tabla 2.1 se muestran algunos ejemplos.

Servicio	Descripción
TV por satélite	Transmisión de canales de televisión desde el satélite hacia las estaciones terrenas receptoras.
Comunicaciones móviles	Conexión de estaciones base terrenas con satélites para transmisión de voz, datos y mensajes de texto en redes móviles vía satélite
Internet por satélite	Conexión de estaciones terrenas a través del enlace feeder para brindar servicios de Internet en áreas con infraestructura limitada.
Redes privadas virtuales (VPN)	Conexiones seguras para acceso remoto a sistemas corporativos y recursos de información mediante enlaces feeder.
Comunicaciones de emergencia	Establecimiento de comunicaciones rápidas y confiables en situaciones de desastres naturales o emergencias.
Servicios de navegación y posicionamiento global	Conexión de estaciones terrenas con satélites para proporcionar servicios de navegación y posicionamiento global, como el sistema GPS.
Fines científicos y observación de la Tierra	Envío de datos científicos, imágenes y otra información recopilada por satélites de observación de la Tierra.

Tabla 2.1: Servicios a los que da conexión el feeder link.

Debido a todos los servicios a los que da conexión, el feeder link va a ser el enlace donde se concentra más tráfico (las megacontelaciones generan un volumen elevado) y si se cae la conexión afectará al resto de las comunicaciones. Por lo tanto, es el enlace que más interesa proteger para poder ofrecer nuevos servicios a través del satélite que requieren mucha más capacidad y velocidad de transmisión de datos para la "Nueva era espacial".

Para alcanzar los requerimientos de las nuevas aplicaciones existen dos vertientes: el uso de las comunicaciones ópticas, que es sobre lo que tratará este trabajo, o la migración a bandas superiores. Pasar a frecuencias de radio más altas, como las bandas Q/V o W, no mejora drásticamente el ancho de banda disponible, y también aumenta la atenuación atmosférica a un nivel comparable con las bandas de comunicación láser, además de los desvanecimientos causados por la atenuación de la lluvia en la banda Q/V [25].

## 2.2.- Comunicaciones ópticas

En los siguientes apartados se van a tratar las comunicaciones ópticas enfocadas a los enlaces por satélite, las cuales se han convertido en una tecnología ampliamente utilizada en redes de telecomunicaciones y transmisión de datos de alta velocidad [26][27] [28] [29].

**Hoja 18 de 73**

Un sistema de comunicaciones ópticas está constituido fundamentalmente por un transmisor óptico, un canal de transmisión de fibra óptica y un receptor. El transmisor óptico contiene la fuente de información analógica/ digital, el circuito modulador y la fuente óptica. El canal introduce ruido y distorsión. Por otro lado, el receptor recibe la señal y la regenera a la salida. Finalmente, el receptor consta de un fotodetector y elementos para la recuperación de la señal original .

La Figura 2.2 muestra un esquema de bloques de un sistema de comunicaciones ópticas.

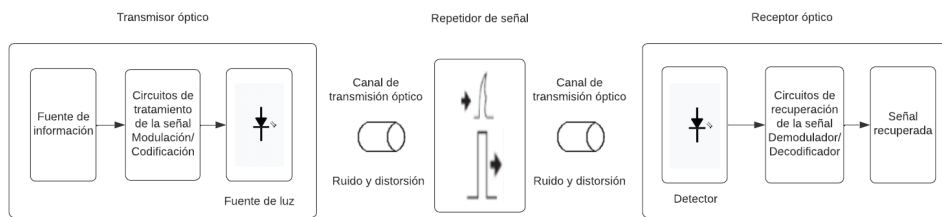


Figura 2.2: Diagrama de un sistema de comunicaciones ópticas [2].

Los emisores son dispositivos optoelectrónicos semiconductores que operan en el infrarrojo próximo (como se puede ver en la Figura 2.3), concretamente diodos LED (Light-Emitting Diode) y diodos láser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Los láseres son más potentes y funcionan a mayor velocidad que los LED, pueden transmitir la luz más lejos con menos errores, aunque conllevan mayor coste. En la Tabla 2.2 se resumen sus características principales.

Característica	LED	Láser
Emisión de luz	No coherente	Coherente
Espectro	Amplio Rango	Monocromático
Direccionalidad	A No direccional	Alta directividad
Intensidad	Baja-Moderada	Alta
Aplicación	Iluminación, pantallas, indicadores lumínicos	Comunicaciones ópticas, investigación científica, medicina, corte y grabado láser
Coste	Económico	Caro

Tabla 2.2: LED vs Láser.

La señal óptica se puede modular para transportar información, de manera similar a como se modula una señal de radio para transmitir sonido o datos. El receptor de luz convierte la señal óptica en una señal eléctrica que se puede procesar y decodificar para recuperar la información transmitida [30].

La comunicación óptica entre satélites presenta varias ventajas sobre otros métodos de comunicación. En primer lugar, las señales ópticas pueden transmitir datos a velocidades mucho más altas que las señales electromagnéticas de radiofrecuencia. Además, las señales ópticas son mucho menos susceptibles a la interferencia y el ruido, lo que garantiza una calidad de señal más alta y una menor probabilidad de errores en la transmisión. También

## ELECTROMAGNETIC SPECTRUM

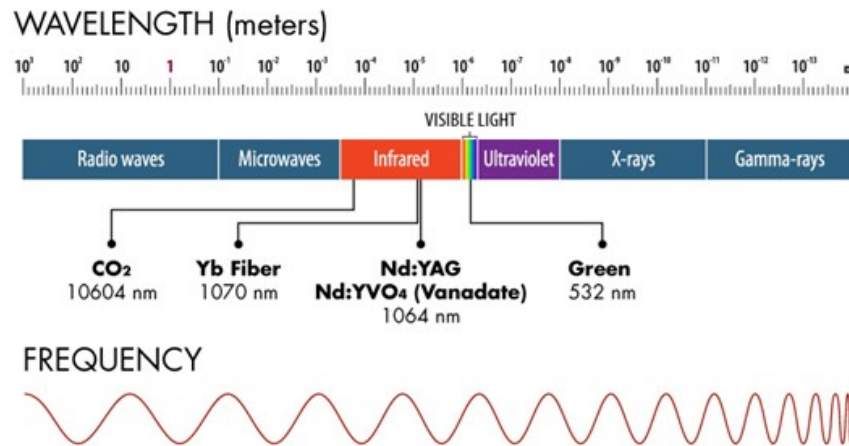


Figura 2.3: Espectro electromagnético. Longitudes de onda de algunos láseres conocidos.

ofrece una mayor seguridad, ya que las señales ópticas son más difíciles de interceptar y descifrar que las señales electromagnéticas de radiofrecuencia. Además, la utilización de las bandas ópticas solventan la crisis del espectro de RF.

Sin embargo, también existen varios desafíos. La alineación precisa de los emisores y receptores de luz es esencial para garantizar una transmisión adecuada, lo que puede requerir sistemas de seguimiento y apuntamiento sofisticados. Además, las señales ópticas pueden sufrir atenuación a medida que viajan a través de la atmósfera terrestre, lo que puede limitar la distancia y la velocidad de transmisión.

### 2.3.- Sistema láser

En esta sección se resumirán las principales propiedades de un sistema láser, así como la regulación existente respecto a su emisión.

#### 2.3.1.- Definición, componentes y propiedades

Láser es el acrónimo de "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" (Amplificación de Luz por Emisión Estimulada de Radiación).

Se puede visualizar en la Figura 2.4, lo que ocurre cuando los átomos (moléculas) absorben energía externa, pasando de un nivel bajo (estado de energía baja) a un nivel alto (estado de energía alta). A este estado se le describe como un estado excitado. Este estado de excitación es inestable y los átomos intentarán volver inmediatamente a un estado de baja energía.

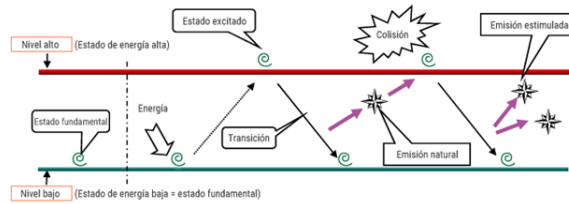


Figura 2.4: Principios de láser [3].

Esto se llama transición. Cuando esto ocurre, se emite una luz que es equivalente a la diferencia de energía. Este fenómeno se llama emisión natural. La luz emitida choca con otros átomos que se encuentran en un estado excitado similar, lo que induce una transición de la misma manera. Esta luz que ha sido inducida a la emisión se llama emisión estimulada. Los láseres emiten haces de luz con alta directividad, lo que significa que las ondas de luz que los componen viajan juntas en línea recta con apenas dispersión, al contrario que las fuentes de luz comunes, que emiten ondas que se dispersan en todas las direcciones. Las ondas de luz en un rayo láser son todas del mismo color (monocromaticidad). La luz ordinaria (como la luz de una bombilla) es generalmente una mezcla de varios colores, que se combinan y aparecen como blanco. Conforme viajan las ondas de luz en un rayo láser, éstas oscilan con sus picos y valles en perfecta sincronización, lo que se conoce como coherencia. Cuando dos rayos láser se superponen entre sí, los picos y valles de las ondas de luz en cada haz se refuerzan entre sí, para generar un patrón de interferencia [3].

	Luz ordinaria	Luz laser
<b>Directividad (rectitud)</b>	 Bombilla	 Láser
<b>Monocromaticidad</b>	 Longitudes de onda no uniformes	 Longitudes de onda uniformes
<b>Coherencia</b>	 Fase no uniforme	 Los picos y valles están alineados.

Figura 2.5: Diferencias entre la luz ordinaria y los rayos láser [3].

Un láser consta de tres componentes:

- Medio activo: es el medio material donde se produce la ampliación óptica. Dependiendo del diseño, el medio láser puede estar compuesto de una mezcla de gases (láser de CO<sub>2</sub>), un cuerpo de cristal (láser YAG) o fibras de vidrio (láser de fibra). Cuando

se inyecta energía al medio láser por medio de la bomba, emite energía en forma de radiación. La ganancia óptica es el factor limitante en la eficiencia del láser, se tiende a buscar medios materiales que la maximicen, minimizando las pérdidas.

Los láseres se pueden dividir en tres tipos: de estado sólido, gas y líquido.

- Cavity óptica resonante o cavity láser: el medio láser activo se sitúa entre dos espejos, el resonador. Uno de esos espejos es un espejo unidireccional. La radiación del medio láser activo se amplifica en el resonador. Al mismo tiempo, sólo una cierta radiación puede abandonar el resonador a través del espejo unidireccional. Esta radiación en forma de haz es la radiación láser.
- Fuente externa de bombeo: para que el medio activo pueda amplificar la radiación, es necesario excitar sus niveles electrónicos o vibracionales de alguna manera. Comúnmente se emplean un haz de luz (bombeo óptico) de una lámpara de descarga u otro láser o una corriente eléctrica (bombeo eléctrico) para alimentar al medio activo con la energía necesaria [31].

### **2.3.2.- Regulación europea en emisión láser**

La regulación europea en emisión láser también es relevante en el contexto de las comunicaciones ópticas. El uso de tecnologías láser desempeña un papel crucial en el transporte de datos de alta velocidad en redes de telecomunicaciones y en aplicaciones como Internet, telefonía, transmisión de video, entre otros. Por ello, tiene un importante impacto en las comunicaciones ópticas al establecer estándares de seguridad, certificación y cumplimiento, protección contra interferencias electromagnéticas y promoción de la eficiencia energética. Estas regulaciones aseguran un despliegue seguro, confiable y eficiente de las tecnologías de comunicaciones ópticas en Europa.

Los sistemas terrestres de enlace de alimentación óptica (OFL) deben implementar medidas de seguridad láser que cumplan con las reglamentaciones correspondientes.

Los láseres no forman un grupo homogéneo de riesgo ya que, dependiendo de sus características técnicas (sistema de bombeo, medio activo y cavity óptica) pueden emitir radiación en un amplio intervalo de longitudes de onda, con potencias o energías de salida muy variables y con una distribución temporal que puede ser continua o en impulsos. Además, las distintas aplicaciones, condicionan el tiempo de exposición, que es un factor clave para determinar el riesgo. La clasificación de un láser en categorías de riesgo permite identificar la peligrosidad del mismo y está basada en el Límite de Emisión Accesible (LEA) para el usuario. Dependiendo del LEA el láser obtendrá una clasificación u otra.

**Hoja 22 de 73**

La Asociación Española de Normalización (UNE) [32] [10], clasifica los láseres en las siguientes categorías de riesgo:

- Clase 1: Seguros en condiciones razonables de utilización.
- Clase 1M: Como la Clase 1, pero no seguros cuando se miran a través de instrumentos ópticos como lupas o binoculares.
- Clase 2: Láseres visibles (400 a 700 nm). Los reflejos de aversión protegen el ojo, aunque se utilicen con instrumentos ópticos. Pueden funcionar en modo continuo o pulsado.
- Clase 2M: Como la Clase 2, pero no seguros cuando se utilizan instrumentos ópticos.
- Clase 3R: Láseres cuya visión directa es potencialmente peligrosa pero el riesgo es menor y necesitan menos requisitos de fabricación y medidas de control que la Clase 3B.
- Clase 3B: La visión directa del haz es siempre peligrosa, mientras que la reflexión difusa es normalmente segura.
- Clase 4: La exposición directa de ojos y piel siempre es peligrosa y la reflexión difusa normalmente también. Pueden originar incendios y explosiones.

La normativa española se basa en el estándar internacional entre otra documentación que consta en su bibliografía. La IEC (Comisión Electrotécnica Internacional) es una organización mundial de normalización que comprende todos los comités electrotécnicos nacionales (Comités Nacionales IEC) [33]. Su objetivo es promover la cooperación internacional en todas las cuestiones relativas a la normalización en los campos eléctrico y electrónico. El IEC colabora estrechamente con la International Organization for Standardization (ISO) [34].

La capacidad de un láser para producir un riesgo vendrá determinada principalmente por los tres primeros factores: longitud de onda, duración o tiempo de exposición y potencia o energía del haz [10].

- Longitud de onda: un haz láser puede emitirse en la región visible del espectro (400-700 nm), en la región ultravioleta (200-400 nm) o en la región infrarroja (700-106 nm), siendo obviamente invisible en los dos últimos casos. La longitud de onda ( $\lambda$ ) de la radiación emitida por un láser depende de la composición química del medio activo. Dependiendo del tipo de compuesto utilizado se producirán una o varias líneas de

emisión a longitudes de onda concretas. Los láseres cuyo medio activo es un colorante son una excepción ya que en ellos se puede variar la  $\lambda$  de salida dentro de un cierto intervalo. Se dice entonces que son láseres sintonizables.

- **Duración:** La salida del haz láser, puede ser de dos formas: onda continua ( $t > 0,25s$ ), o Impulsos o tren de impulsos ( $t < 0,25s$ ), dependiendo de la forma en que el sistema de bombeo aporta la energía al medio activo.
- **Potencia o energía:** La potencia de salida de los láseres varía mucho de unos tipos de láser a otros. Los láseres continuos se caracterizan por su potencia máxima de salida (medida en vatios), mientras que los láseres de impulsos se caracterizan por su energía total por pulso (medida en julios), debiéndose conocer además la potencia pico, la duración del pulso y la frecuencia de repetición del pulso. Existen varias técnicas para provocar pulsos muy cortos (ns a ps) obteniendo potencias de pico muy altas, (se puede llegar hasta los MW o GW) destacando entre ellas Q-Switch y Mode locking.

Para describir un láser, generalmente se cita el medio activo seguido de la duración del pulso y de su potencia máxima de salida o de su energía total/pulso.

Algunos ejemplos serían láser He-Ne CW de 5 mW será un láser cuyo medio activo es He-Ne, que emite radiación visible de forma continua con una potencia media de 5 mW o un láser Nd-YAG 150 mJ/10 ns, cuyo medio activo es un granate de ytrio y aluminio dopado con neodimio, que emite pulsos de radiación IR de 150 mJ con una duración de cada pulso de 10 nanosegundos [10].

### 2.3.3.- Unidades de medida de una exposición a radiación láser

Como el efecto biológico de una radiación incidente sobre un tejido depende de la energía absorbida por unidad de superficie absorbente, la exposición a radiación láser "directa" se medirá en términos de irradiancia (láseres continuos) o de exposición radiante (láseres de impulsos). Cuando la visión de la fuente no es puntual, o se trata de una visión de reflexión difusa de un haz, hay que tener en cuenta además la radiación por unidad de ángulo sólido de emisión (sr), utilizándose entonces la radiancia (láseres continuos) o la radiancia integrada (láseres de impulsos).

Estas unidades están definidas por la norma CEI-825-84 [10] de la siguiente forma:

- **Irradiancia:** Flujo radiante por unidad de superficie receptora.

$$E = P/A \quad [W/cm^2] \quad (2.1)$$

**Hoja 24 de 73**

Donde  $E$  es la irradiancia en  $W/cm^2$ ,  $P$  es el flujo radiante en  $W$  (potencia) y  $A$  es el área de la superficie de la antena receptora en  $cm^2$

- Exposición radiante: Representa la energía total incidente por unidad de superficie receptora. Se utiliza para medir la cantidad de energía que llega a un receptor cuando la fuente es pulsada.

$$H = E \cdot t \quad [J/cm^2] \quad (2.2)$$

Donde  $H$  es la exposición radiante en  $J/cm^2$ ,  $E$  es la irradiancia en  $W/cm^2$  y  $t$  es el tiempo de exposición en segundos.

- Radiancia: Potencia radiante de una superficie emisora de radiación por unidad de superficie y por unidad de ángulo sólido.

$$L = d\phi / dA \cdot d\Omega \quad [Wsr^{-1}m^{-2}] \quad (2.3)$$

Donde  $L$  es la radiancia  $Wsr^{-1}m^{-2}$ ,  $d\phi$  es el flujo radiante diferencial en  $W$ ,  $dA$  es el diferencial de área de la superficie emisora en  $m^2$  y  $d\Omega$  es el diferencial de ángulo sólido en  $sr$

- Radiancia integrada: Es la integral de la radiancia durante un tiempo de exposición determinado, expresada como energía radiante por unidad de área de la superficie emisora y por unidad de ángulo sólido de emisión.

$$E = \int L d\phi \quad [Jm^{-2}sr^{-1}] \quad (2.4)$$

Donde  $E$  es la radiancia integrada en  $Jm^{-2}sr^{-1}$ ,  $L$  la radiancia en  $Wsr^{-1}m^{-2}$ ,  $d\phi$  y  $\int$  denota la integral en el rango de ángulo sólido de emisión.

Un producto láser puede consistir en un solo láser con o sin una fuente de alimentación separada o puede incorporar uno o más láseres en un sistema óptico, eléctrico o mecánico complejo.

Normalmente, los productos láser se utilizan para la demostración de fenómenos físicos y ópticos; procesamiento de materiales; lectura y almacenamiento de datos; transmisión y visualización de información; etc. Además de los peligros derivados de la radiación láser, el documento contempla otros peligros derivados de los equipos láser también, como incendios y descargas eléctricas.

Es responsabilidad del fabricante proporcionar la clasificación correcta de un producto láser. El producto se clasificará sobre la base de esa combinación de producción potencia(s)



y longitud de onda(s) de la radiación láser accesible en todo el rango de capacidad durante la operación en cualquier momento después de la fabricación, lo que resulta en su asignación a la más alta clase apropiada. El límite de emisión accesible (AEL) para Clase 1 y 1M, Clase 2 y 2M, Clase 3R y Clase 3B (enumeradas en orden creciente de riesgo) se dan en las tablas 1, 2, 3 y 4 respectivamente de [35].

Las tablas clasificatorias de la norma CEI-825-1984 [10] están basadas en el criterio de la exposición máxima permisible (EMP), definida como nivel de radiación láser al que, en circunstancias normales pueden exponerse las personas sin sufrir efectos adversos. Los niveles de EMP representan el nivel máximo al que es posible exponer los ojos o la piel sin que se produzcan lesiones inmediatas ni después de un periodo prolongado de tiempo. Se utilizan como guía en el control de exposiciones, pero se recomienda que, en cualquier caso, la exposición a radiación láser sea la mínima posible.

A continuación se muestra un resumen de dichos límites de emisión en la Tabla 2.3:

Clase de Láser	EMP	Duración de Exposición	Distancia de Seguridad
Clase 1	No hay límite especificado, se consideran intrínsecamente seguros	-	-
Clase 1M	0.25 mW (para $\lambda$ :302.5-4000 nm)	10 seg	Evitar observación directa
Clase 2	1 mW para $\lambda$ :400-700 nm láser continuo	0.25 seg	Evitar observación directa
Clase 2M	1 mW para $\lambda$ :302.5-4000 nm láser continuo	0.25 seg	Evitar observación directa
Clase 3A	5mW (emisión continua) o 5 veces clase 2 (emisiones pulsadas) para $\lambda$ :400-700 nm. E límite de $25Wm^{-2}$	0.25 seg	Evitar observación directa y con instrumentos ópticos
Clase 3B	Láseres continuos < 0.5 W y láseres pulsados < $105Jm^{-2}$	10 seg	Evitar exposición al haz, distancia mínima de 13 cm
Clase 4	Gran potencia, de salida que sobrepasa los LEAs de la Clase 3B. Reflexiones difusas peligrosas	-	Evitar exposición ocular y en piel

Tabla 2.3: Límites de emisión accesibles (LEAs) para una clase determinada. (Tablas I a IV de la Norma CEI-825-84) [10].

Además, existen unos valores de exposición máximas permisible (MPE). Los valores de exposición máximos permisibles son para los usuarios y se establecen por debajo de los niveles de peligro conocidos, basándose en la mejor información disponible de estudios experimentales. Los valores MPE se encuentran en la tabla 9 (20) [10].

A finales de 2021 la NASA puso en órbita el Laser Communications Relay Demonstration (LCRD) [4], que aprovechará el poder de la luz infrarroja para enviar y recibir información codificada en rayos láser invisibles de un lugar a otro. Una vez en órbita, LCRD demostrará los beneficios de utilizar láseres infrarrojos para transmitir información desde el espacio. En la Figura 2.6 se representa un ejemplo de comunicación de datos por radio y por láser entre la Tierra y Marte.

Se necesitarían aproximadamente nueve semanas para transmitir un mapa completo de Marte a la Tierra con los sistemas de radiofrecuencia actuales. Con láseres, llevaría unos nueve días [4].

Además, los sistemas de comunicaciones láser necesitan menos volumen, peso y potencia, lo que los hace más interesantes para las misiones espaciales. Menos masa significa más

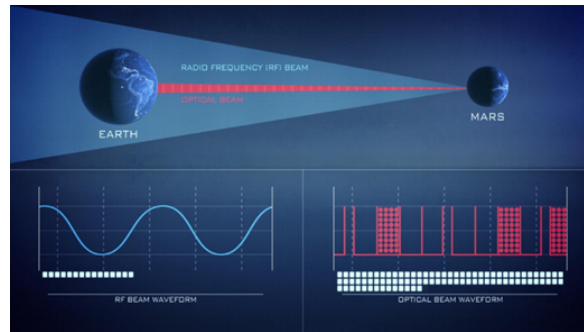


Figura 2.6: Representación gráfica de la diferencia en las velocidades de datos entre las comunicaciones por radio (en la imagen, “RF beam”) y láser (“optical beam”). NASA. [4]

espacio para los instrumentos científicos, y menos energía significa menos drenaje de los sistemas de energía de las naves espaciales.

Los terminales de comunicaciones láser en el espacio utilizan anchos de haz más estrechos que los sistemas de radiofrecuencia, lo que significa que las estaciones terrestres pueden recibir más datos a la vez, proporcionando “huellas” más pequeñas que pueden minimizar la interferencia, o mejorando la seguridad al reducir drásticamente el área geográfica donde alguien podría interceptar una señal de comunicaciones. Sin embargo, un telescopio de comunicaciones láser que apunta a una estación terrestre debe ser preciso hasta la exactitud cuando se transmite desde miles o millones de kilómetros de distancia. Una desviación de incluso una fracción de grado puede hacer que el láser pierda su objetivo [4].

En [3], se comenta que uno de los retos que se tuvieron que superar fueron las condiciones del tiempo en la atmósfera de la Tierra, ya que no existe un cable que proteja las señales. Una vez atraviesan las nubes de la atmósfera ya no existe la problemática.

Otro ejemplo del láser aplicado a las comunicaciones satelitales, es que en la primera mitad de 2021, desde Starlink, hubo muchos lanzamientos de estos satélites, pero luego hubo un parón debido a que decidieron añadir comunicaciones láser a los satélites para que pudieran comunicarse entre ellos sin necesidad de usar estaciones terrestres, reduciendo de esta manera la cantidad de estaciones en tierra [36].

## 2.4.- Enlace feeder basado en tecnología laser

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) define un enlace de conexión como un enlace de radio desde una estación terrestre en un punto fijo especificado a una estación espacial, o viceversa, transmitir información para un espacio de comunicaciones servicio distinto del servicio fijo por satélite [37].

En el artículo [38] comentan que las tasas de datos más altas que se podían aplicar de manera confiable a un enlace de conexión entre la tierra y un satélite GEO eran en la banda Ka con un rendimiento total de aproximadamente 70 Gb/s. En [5] se muestran las ventanas de transmisión en cielo despejado alrededor de la longitud de onda de 1550 nm (193 THz) y de 1064 nm (282 THz). Ambas ventanas con más de 10 THz de ancho de banda. Para estas dos ventanas, se han desarrollado tecnologías de alta velocidad de datos ( $>1$  Gb/s) para comunicaciones espaciales [39] y [40]. En un entorno de espacio libre, 1550 nm tiene más ventajas en comparación con 1064 nm: alrededor de 4 veces menos luz de fondo, menos perturbación de turbulencia (con un parámetro de Fried 1,4 veces mayor) y una mejor seguridad ocular (los láseres de 1550 nm alcanzan el límite de seguridad ocular con 20 veces más potencia que los láseres de 1064 nm [41]).

En [5] proponen un diseño de un enlace feeder para GEO basado en la emisión de haces gaussianos y con un haz monomodo hasta el fotodetector, ya que el rendimiento de la comunicación mejora haciendo que la señal óptica se propague como un haz monomodo hasta el fotodetector. Los registros de transmisión de fibra generalmente se obtienen sobre fibras monomodo y, para comunicaciones en el espacio libre, el láser idealmente debería producir un haz gaussiano para maximizar la ganancia de Tx.

En la Figura 2.7 se presenta un presupuesto de enlace que consideran conservador ya que asume un enlace elevación de  $30^\circ$  sobre el horizonte y no incluye la ganancia de codificación. El poder del enlace margen (alrededor de 6 dB) podría compensar atenuaciones fuertes esporádicas en cielo despejado o poco nuboso.

En los últimos años, se ha producido un avance significativo en el desarrollo de tecnologías láser aplicadas a los enlaces feeder [27][42]. Esta nueva generación de enlaces basados en láser ofrece una serie de ventajas clave en comparación con las tecnologías tradicionales de radiofrecuencia lo que supondrá un gran avance en las comunicaciones espaciales y abrirá nuevas oportunidades en la era de la exploración espacial avanzada.

#### **2.4.1.- Características del feeder**

Las principales características del enlace feeder basado en tecnología láser son:

1. Alta capacidad de transmisión de datos.
2. Baja atenuación de la señal durante la transmisión.
3. Menor consumo de energía en comparación con las tecnologías RF.
4. Mayor inmunidad a interferencias electromagnética.

	Uplink	Downlink	Unit
<b>Total link parameters</b>			
Total data rate	100	40	Gb/s
Number of WDM channels	40	16	
Wavelength window	1550	1550	nm
<b>WDM channel parameters</b>			
Data rate	2.5	2.5	Gb/s
Modulation	DPSK	DPSK	
Optical Tx-Pow (Avg.)	4 x 10 (4 beams)	0.2	W
Tx-diameter	130	200	mm
Link distance	39 000	39 000	km
Rx-diameter	200	1 000	mm
Rx-sensitivity @BER=10 <sup>-6</sup>	100	100	Photons/bit
<b>Channel Link budget</b>			
Tx-Power	46.0	23.0	dBm
Tx-Optics loss	-2.0	-1.5	dB
Tx-Gain	110.4	114.3	dBi
Free-space loss	-290.0	-290.0	dBi
Rx-Gain	111.8	125.8	dBi
Atmosph. attenuation	-1.0	-1.0	dB
Rx-Optics loss	-7.5	-5.0	dB
Pointing loss	-3.2	-3.2	dB
Scintillation loss	-2.5	-1.1	dB
Beam-spread loss	-1.6	-0.0	dB
Rx-Power:	-39.5	-38.8	dBm
Target Rx-Power	-44.9	-44.9	dBm
Link Margin	5.4	6.2	dB

Figura 2.7: Parámetros de transmisión previstos para un enlace de conexión óptico y el balance de potencia asociado [5]

5. Mayor seguridad en la transmisión de datos.
6. Menor tamaño y peso para facilitar la implementación en satélites y estaciones terrena.

En la Figura 2.8 se presenta un presupuesto de enlace óptico de [6]:

Estas características hacen que el enlace feeder basado en tecnología láser sea una opción atractiva y los nuevos requerimientos y tráfico de las comunicaciones espaciales.

A continuación, en la Tabla 2.4 se mostrará una comparativa entre un enlace feeder RF y un enlace feeder láser:

Característica	Feeder Link RF	Feeder Link Láser
Principio de transmisión	Ondas electromagnéticas en el rango de RF	Pulsos de luz láser para la transmisión de datos
BW	Limitado por las limitaciones del espectro de RF y la congestión de frecuencias	Mayor ancho de banda disponible, permite una mayor capacidad de transmisión de datos.
Interferencia	Susceptible a interferencias de otras fuentes RF y obstáculos físicos	Menos susceptible a la interferencia de otras fuentes y menos afectado por obstáculos físicos
Latencia	Puede haber una mayor latencia debido a las limitaciones de velocidad de las ondas de RF	Tiempos de transmisión más rápidos, menor latencia
Alcance	Puede cubrir grandes distancias sin la necesidad de alineación precisa entre las antenas	Requiere alineación precisa y es más adecuado para distancias cortas a medianas
Seguridad	Más fácil de interceptar y comprometer la seguridad de la transmisión	Más difícil de interceptar y más seguro debido a la naturaleza direccional y focalizada del láser
Coste	Más asequible y disponible	Más costoso y requiere tecnología especializada
Eficiencia energética	Menor eficiencia energética debido a la necesidad de amplificación de señal	Mayor eficiencia energética, ya que la luz láser se atenúa menos durante la transmisión
Aplicaciones principales	Comunicaciones satelitales convencionales, transmisión de televisión, telefonía móvil	Comunicaciones satelitales de alta capacidad, enlaces inter-satélite, transmisión de datos a alta velocidad

Tabla 2.4: Feeder link RF vs feeder link láser.

Item	Unit	Value
Aperture power (TX channel power), $P_T$	W	10
TX channel beam divergence, $2\theta$	$\mu\text{rad}$	42.2
FST aperture diameter, $D_T$	cm	6.5
Communication link distance, $z$	km	4000
Data rate, $F$	Gbps	10
TX channel radiation wavelength, $\lambda$	nm	1550
Average $\overline{BER}$	–	$10^{-8}$

Figura 2.8: Parámetros de transmisión previstos para un enlace de conexión óptico y el balance de potencia asociado[6].

#### 2.4.2.- Interferencias en el canal feeder

En este apartado se van a identificar aquellos fenómenos que pueden interferir en el enlace feeder y degradar la señal o incluso causar la rotura de éste, con el riesgo que esto conlleva, ya que es el enlace con mayor tráfico.

En la Figura 2.9 se puede observar una clasificación de los principales agentes que causan las pérdidas en el canal feeder.

A pesar de los avances tecnológicos, la mayor limitación de los enlaces ópticos inalámbricos o comunicaciones ópticas de espacio libre es debida a las condiciones atmosféricas, donde la trayectoria del haz empleado siempre incluirá efectos de turbulencia y dispersión [43].

El primer paso en el diseño de un sistema de comunicaciones a través de cualquier medio es saber que comportamiento tendrá una onda o señal al propagarse por dicho medio. En el canal atmosférico se tienen dos fenómenos principales: la dispersión y el centelleo inducido por la turbulencia atmosférica, y cada uno tiene una repercusión distinta sobre la señal [7].

La lluvia afecta más a las comunicaciones por radiofrecuencia como se analizó en el TFM previo [44] que a las comunicaciones ópticas debido a las diferencias en la frecuencia de operación y en la forma en que las ondas electromagnéticas interactúan con las gotas de lluvia. La longitud de onda más larga de las ondas de radiofrecuencia las hace más susceptibles a la atenuación y dispersión causadas por las gotas de lluvia, mientras que las comunicaciones ópticas. Por ello, el apartado se va a centrar en aquellos fenómenos que afectan más a las comunicaciones ópticas.

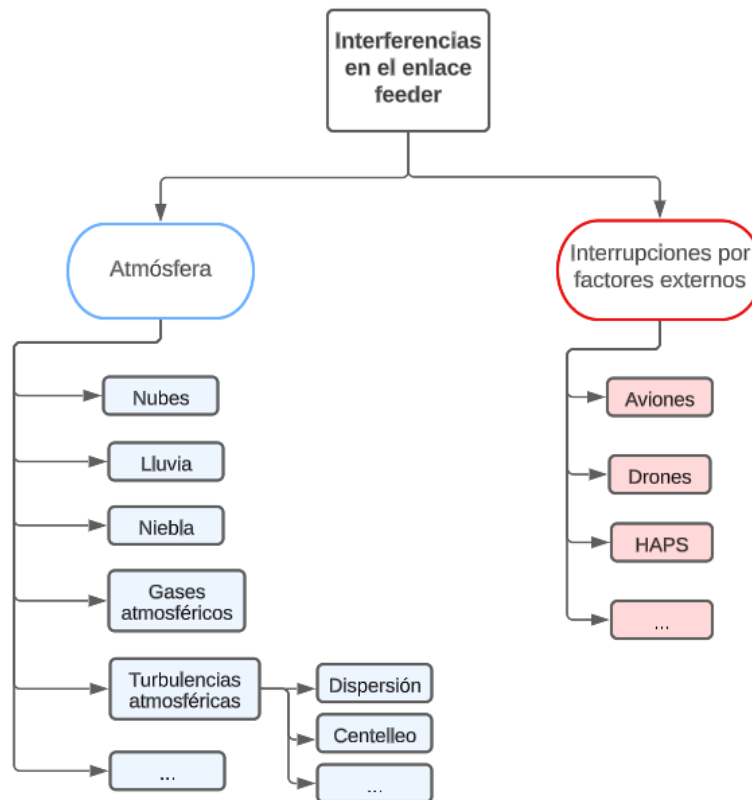


Figura 2.9: Clasificación de las principales interferencias en el canal feeder.

■ Nubes

En las comunicaciones ópticas es principal problema es la propagación de un haz láser a través de las nubes y niebla, ya que las nubes formadas por partículas de agua tienen un tamaño comparable con las longitudes de onda empleadas en las comunicaciones ópticas. La aleatoriedad de su aparición puede hacer que el enlace quede completamente cortado debido a la pérdida de la línea de visión directa [45].

En comunicaciones ópticas es posible modelar la señal como un conjunto de fotones. Cada uno de estos fotones se propaga por el medio hasta interactuar con una partícula. En este punto, el fotón se desvía alterando su dirección de su propagación y continúa en esta nueva dirección hasta que choca con una nueva partícula y el proceso se repite [7].

De acuerdo a la teoría Mie, la cual pretende relacionar lo anterior con la propagación en el medio atmosférico, la dirección de la propagación en tres dimensiones viene dada por la función de distribución de probabilidad conocida como función de fase. En otras palabras, la función de fase es la PDF del ángulo sólido  $\Psi = (\Omega, \phi)$  y está normalizado para que su integral sobre todo el ángulo sólido sea unitaria [46].

$$\int_{4\pi} P \Theta d\psi = \int_0^\pi \int_0^{2\pi} P \Theta \sin(\Theta) d\Theta d\varphi = 1 \quad (2.5)$$

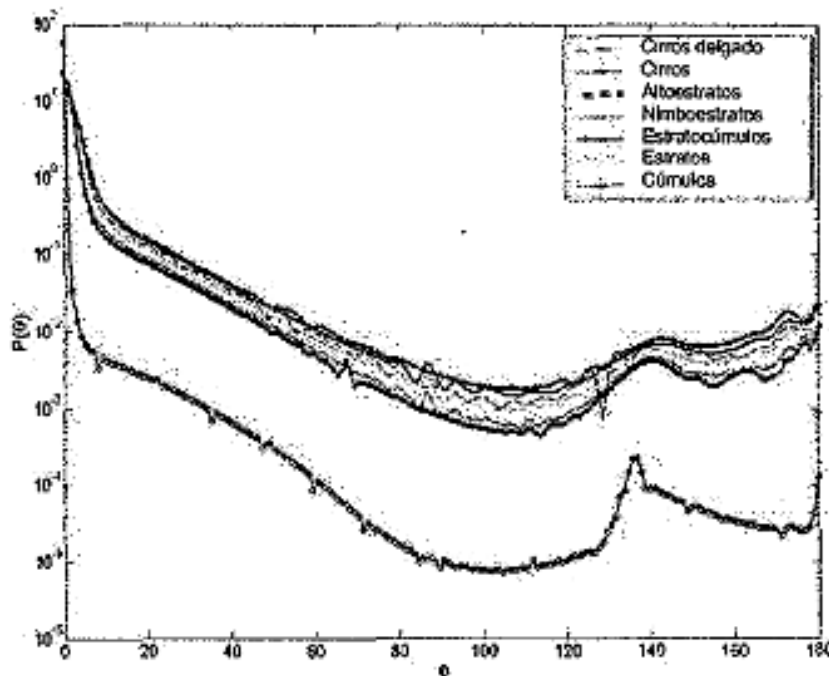


Figura 2.10: Función de fase para diversos tipos de nubes [7].

Dado que el ángulo azimut de dispersión está uniformemente distribuido entre  $[0, 2\pi]$ , la función de fase puede ser graficada únicamente en función del ángulo  $\theta$ . La Figura 2.10 muestra la función de fase para diferentes tipos de nubes.

A continuación, se describen algunos de los modelos de nubes utilizados para modelar su efecto en los enlaces ópticos satelitales:

1. Modelo de nube plana: Este modelo considera una nube como una superficie plana con una altura constante. La atenuación de la señal óptica se calcula utilizando la ley de Beer-Lambert, que establece que la atenuación es proporcional a la densidad óptica del medio a través del cual se propaga la señal. La densidad óptica se calcula a partir de la densidad de la nube y de la longitud de onda de la señal óptica.
2. Modelo de nube esférica: Este modelo considera la nube como una esfera con un radio y una densidad variables. La atenuación se calcula utilizando la ley de Beer-Lambert y la densidad óptica se calcula a partir de la densidad de la nube y de la distancia entre la nube y el satélite.
3. Modelo de nube estadístico: Este modelo utiliza estadísticas de las nubes para estimar la atenuación de la señal óptica. Se basa en la observación de la frecuencia

### Hoja 32 de 73

y la distribución de la densidad óptica en diferentes tipos de nubes. Este modelo es más complejo que los modelos anteriores y requiere una gran cantidad de datos de observación para ser efectivo.

4. Modelo de nube realista: Este modelo utiliza datos de imágenes de satélite para modelar las nubes de manera más real. Se utilizan algoritmos de procesamiento de imágenes para identificar y caracterizar diferentes tipos de nubes en la imagen. La atenuación se calcula utilizando la ley de Beer-Lambert y la densidad óptica se calcula a partir de la densidad de la nube y de la distancia entre la nube y el satélite.

Estos modelos de nubes son herramientas importantes para diseñar y analizar sistemas de comunicaciones por satélite que utilizan enlaces ópticos, ya que permiten predecir y modelar el efecto de las nubes en la señal óptica.

- Niebla Otro fenómeno de gran repercusión para las comunicaciones ópticas inalámbricas es la niebla, debido a la relación entre el tamaño de las partículas (gotas) y la longitud de onda (infrarrojo) empleada en estos enlaces. Si se tiene en cuenta la estrecha relación entre la densidad de la niebla y el parámetro visibilidad, es posible definir tres niveles:
  - Neblina densa (0.05- 0.2Km),
  - Neblina media (0.2- 1Km)
  - Neblina ligera (1 - 5Km).

La atenuación en función de la visibilidad es expresada en la siguiente ecuación:

$$L_v = \exp\left[-\frac{3,9}{V} \frac{\lambda^m}{55} L\right] \quad (2.6)$$

Donde  $V$  es la visibilidad [Km],  $L$  es la distancia que el haz se propaga y  $m$  es la distribución del tamaño para las gotas de agua que conforman dicha niebla. [47]

- Turbulencias atmosféricas En enlace descendente láser SatCom, los principales efectos adversos son las turbulencias atmosférica, la atenuación atmosférica, y las fluctuaciones del ángulo de llegada (AoA) [48].

La radiación solar absorbida por la superficie terrestre hace que el aire cercano a ella sea más caliente que el que se encuentra a mayor altura. Por consiguiente, el aire más caliente se vuelve menos denso y se eleva mezclándose de forma turbulenta con el aire más frío, lo que hace que la temperatura del aire fluctúe de forma aleatoria. Dichas perturbaciones causadas por la turbulencia pueden ser vistas como celdas discretas o



**Hoja 33 de 73**

remolinos de distintas temperaturas. Las perturbaciones actúan como prismas refractivos de diferentes tamaños e índices de refracción, lo que ocasiona que, durante su interacción con el haz de luz, resulten en perturbaciones aleatorias de amplitud y fase, o como centelleo. Éste fenómeno provoca desvanecimientos de la potencia óptica recibida, lo que conlleva a una degradación del funcionamiento del sistema de comunicación.

Existen diversos efectos de la turbulencia atmosférica, entre los cuales se pueden mencionar un ensanchamiento del haz, más allá de la difracción pura, beam wander o variaciones aleatorias de la posición del centroide del haz y una redistribución aleatoria de la energía del haz con respecto a su sección transversal. Éstos ocasionan fluctuaciones de irradiancia, entre otros efectos [49].

Dada la complejidad que involucra el modelado matemático de la turbulencia atmosférica, no existe un modelo universal para todas las clasificaciones de turbulencia.

Sin embargo, existen diversos modelos que sirven para representar las fluctuaciones de irradiancia en un receptor óptico, debido a las turbulencias atmosféricas, ocasionadas por la variación de temperatura en las diversas capas de la atmósfera. Estos modelos se caracterizan principalmente por la varianza de Rytov, la cual se define de la forma [50] [51] y [52].

$$\sigma_I^2 = 1,23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (2.7)$$

Donde  $C_n^2$  es el parámetro de estructura del índice de refracción expresado en  $m^{-2/3}$ ,  $k$  es el número de onda dado por  $k = 2\pi/\lambda$ , donde  $\lambda$  es la longitud de onda en metros y  $L$  en metros la distancia de propagación entre el transmisor y el receptor óptico.

La varianza de Rytov, representa la varianza de la irradiancia normalizada, también conocida como índice de centelleo, de una onda plana bajo fluctuaciones débiles, pero también se considera una medida de la intensidad de la turbulencia óptica cuando se extiende a condiciones de fluctuaciones fuertes, en las cuales se aumenta  $C_n^2$ ,  $L$  o ambas. En términos de la varianza de Rytov, la turbulencia óptica se puede clasificar como:

$\sigma_I^2 < 1$  Fluctuaciones de irradiancia débil

$\sigma_I^2 \geq 1$  Fluctuaciones de irradiancia moderadas a fuertes

Pérdidas por rotura del enlace óptico: aviones, drones, HAPS, etc.

La rotura del enlace feeder óptico en por aeronaves puede ocurrir cuando una de estas se cruza en el camino del haz de comunicación entre un satélite y una estación terrena. Esto

puede interrumpir temporalmente la señal y afectar la calidad de la comunicación.

Para evitar este tipo de situaciones, los satélites de comunicaciones suelen estar equipados con sistemas de seguimiento y control de posición, que les permiten ajustar su orientación para evitar obstáculos y mantener una conexión estable con las estaciones terrenas.

En caso de que se produzca una rotura del enlace óptico, los sistemas de respaldo pueden entrar en funcionamiento para mantener la comunicación mientras se restaura la conexión principal. También se pueden utilizar tecnologías de diversidad de enlace, que permiten que la comunicación se realice a través de múltiples canales para mejorar la fiabilidad y la resistencia a las interrupciones.

Actualmente, se están realizando algunos estudios como [53], en el que se utilizan HAPS para recopilar y procesar datos de IoT de áreas rurales remotas sin cobertura de comunicación tradicional. Son sistemas que utilizan plataformas aéreas, generalmente aerostatos o drones de gran altitud, para proporcionar servicios de comunicaciones y observación desde altitudes elevadas en la atmósfera. Por lo tanto, habrá que tenerlos en consideración como motivo de rotura del enlace.

## **2.5.- Protección del enlace feeder**

Como se ha comentado en apartados anteriores, en enlace feeder va a ser el que concentre mayor tráfico y del que dependen gran cantidad de servicios, por lo tanto es necesario protegerlo. Para solventar el problema, se han identificado dos técnicas principales: la diversidad y los protocolos de restauración de enlaces.

La técnica de diversidad y los protocolos de restauración desempeñan un papel fundamental en la protección del enlace feeder en sistemas de comunicaciones. La diversidad se refiere a la utilización de múltiples rutas o medios de transmisión para mejorar la confiabilidad y disponibilidad de la conexión. Esto implica la implementación de diferentes trayectorias físicas o rutas de comunicación para evitar posibles fallos o interferencias en el enlace feeder. Por otro lado, los protocolos de restauración permiten recuperar rápidamente el servicio en caso de que ocurra una interrupción en la ruta principal. Estos protocolos están diseñados para detectar automáticamente la falla y redirigir el tráfico a una ruta de respaldo o alternativa, minimizando el tiempo de inactividad y asegurando una comunicación continua y confiable.

### 2.5.1.- Diversidad

El concepto de diversidad es ampliamente estudiado [54], [55], por lo que muchos de los actuales y emergentes sistemas de comunicaciones inalámbricas lo usan para combatir los efectos del multicamino. Las técnicas de diversidad explotan la naturaleza aleatoria del canal debida al comportamiento estadístico del desvanecimiento, ya que se dispone de más de una copia de la señal transmitida en origen al experimentar cada una de las versiones un canal diferente.

Según el método utilizado las técnicas para aumentar la diversidad en los gateways de comunicaciones ópticas por satélite se pueden clasificar de la siguiente manera en Figura 2.11:

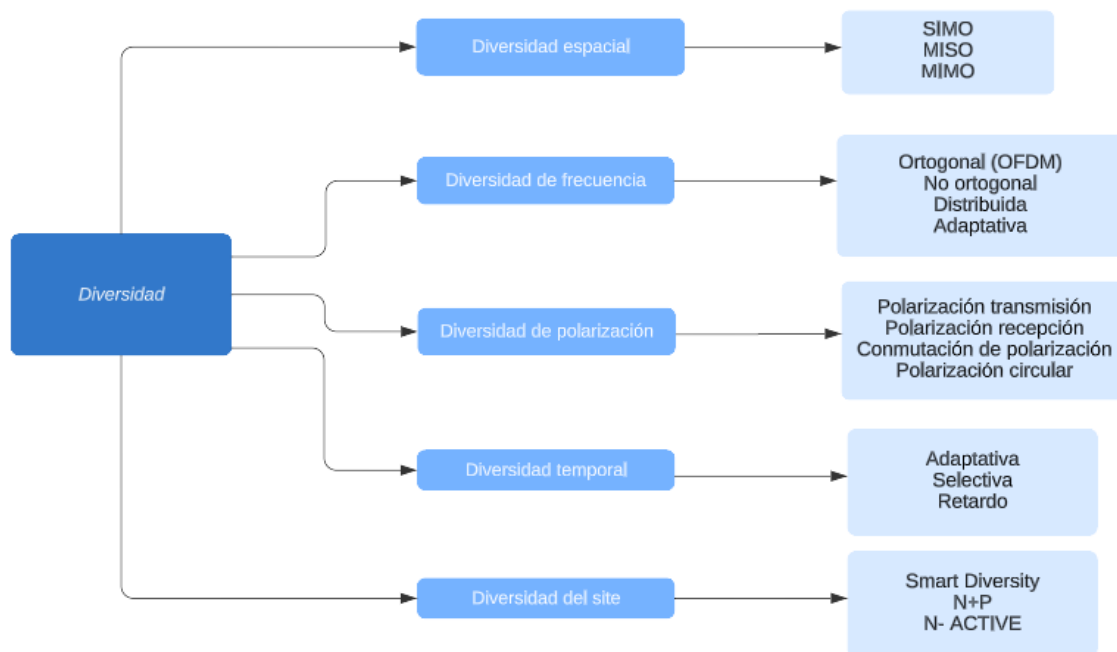


Figura 2.11: Clasificación de las técnicas de diversidad.

- **Diversidad espacial:** La diversidad espacial es una técnica en la que se utilizan antenas múltiples para transmitir señales desde diferentes ubicaciones. Esto ayuda a reducir la interferencia y aumentar la calidad de la señal.
- **Diversidad de polarización:** La diversidad de polarización es una técnica en la que se utilizan polarizadores para transmitir señales de diferentes polarizaciones. Al utilizar esta técnica, se pueden transmitir múltiples señales a través de un solo canal óptico, lo que aumenta la capacidad de transmisión.
- **Diversidad de frecuencia:** La diversidad de frecuencia es una técnica en la que se utilizan diferentes frecuencias para transmitir señales. Al utilizar diferentes frecuencias,

se pueden transmitir múltiples señales simultáneamente sin interferencia.

- **Diversidad temporal:** La diversidad temporal es una técnica en la que se transmiten múltiples copias de la misma señal en diferentes momentos. Esto ayuda a reducir los errores y mejorar la calidad de la señal.
- **Smart Site Diversity:** Existen técnicas diversidad inteligente permiten explotar la diversidad espacial existente entre los puertos de enlace con el fin de relajar los requisitos en el sistema márgenes, sin necesidad de estaciones terrenas adicionales [56].

Según dichas técnicas, cada haz de enlace de usuario es atendido por un grupo de GW en lugar de por un solo GW. Si un enlace GW deja de estar disponible, los usuarios asignados a ese enlace realiza un traspaso (posiblemente) transparente sobre un enlace servido por otro GW

Se puede lograr una buena descorrelación de desvanecimiento por lluvia debido a la gran distancia entre GW, redundancia ante fallos y los recursos se explotan de manera eficiente, ya que todos los GW se usan la mayor parte del tiempo. Además, la sincronización de GW solo se requiere a nivel de red.

Para un haz dado, cuanto mayor sea el número de GW del grupo, mayor será el margen de desvanecimiento requerido y menor la capacidad de pérdida cuando un enlace GW no se encuentra disponible.

De todas estas técnicas de diversidad, el análisis de del siguiente capítulo se va a centrar en la diversidad del site, por su menor complejidad de implementación respecto a otras técnicas, a pesar de su coste.

A continuación, en [57] se presentan algunos esquemas para explotar la diversidad que se tratarán con más detalle en el próximo capítulo:

- **N+P DIVERSITY:**

Hay dos conjuntos de puertos de enlace: N puertos de enlace activos y P puertos de enlace redundantes.

En un sistema donde solo hay una estación redundante, si dos de los gateway no están disponibles, entonces solo los haces de una puerta de enlace serán atendidos por el puerta de enlace redundante. Al extender las puertos de enlace a grandes distancias, es poco probable que más de dos puertos de enlace experimenten un desvanecimiento profundo. El número de puertos de enlace redundantes necesarias para garantizar la disponibilidad de ciertos enlaces de conexión está sujeta a los niveles de disponibilidad requerido y al tamaño de la red.

**Hoja 37 de 73**

- N-ACTIVE: También llamado esquema “N + 0”, todas las puertas de enlace (N) están activas y disponibles para reenviar datos al mismo tiempo que obtiene acceso al canal compartido del satélite a través de multiplexación de frecuencia o de tiempo.

La opción de multiplexado en frecuencia requiere un enlace directo de multiportadora. Este esquema es totalmente compatible con una carga útil transparente y otras técnicas como el haz formación, salto de haz, etc. Su objetivo es distribuir un haz tráfico a través de múltiples puertas de enlace, lo que reduce el riesgo de que todo el haz deja de estar disponible. No obstante, el mayor problema radica en la cantidad de portadoras que deben manejar la carga útil y las pasarelas, si se utilizan todas las pasarelas.

Para el segmento terrestre no es un gran inconveniente, pero el equipo en la carga útil debe aumentarse de acuerdo con el número de puertas de enlace en el grupo. Como resultado, el número de transpondedores tiene que aumentarse y esto constituye una restricción de carga útil. Además, como el número de las pasarelas del pool aumenta, en consecuencia se reduce el ancho de banda de la portadora y aumenta la degradación de la señal.

Por otro lado, si el multiplexado es temporal, cada haz durante un período sirve para más de una puerta de enlace. Este sistema opera enrutando ráfagas TDMA desde cualquier enlace ascendente a cualquier enlace descendente. La interconectividad entre todos los pares puede ser realizado por una matriz de conmutación de microondas de alta velocidad. En el satélite se almacena una matriz de tráfico que se actualiza periódicamente y que contiene las interconexiones entre enlaces ascendentes y descendentes durante el periodo de una trama.

Esta opción no tiene un impacto importante en la carga útil excepto por el interruptor y el reloj. El equipo de carga útil no necesita aumentarse como en la multiplexación de frecuencia. Sin embargo, se requiere una sincronización muy precisa entre los TDM de las puertas de enlace.

En esta configuración, la carga útil ya no está limitada por mayor canalización/enrutamiento como con multiplexación de frecuencia. La dificultad radica en la rapidez y precisión del cambio. Este esquema tiene el potencial de permitir más puertas de enlace para servir un haz sin mayor impacto en la carga útil.

### 2.5.2.- Protocolos de restauración

Otra forma de proteger el enlace feeder es mediante los mecanismos existentes de protección y restauración de enlaces en los protocolos de red terrestre. Estos se definen en varios estándares [58].

Respecto al transporte de señales digitales a través de fibras ópticas existen los siguientes protocolos:

- OTN (Optical Transport Network):

Es un protocolo para transmitir señales digitales a través de fibras ópticas. Fue estandarizado por la ITU-T como Recomendación G.709. El protocolo OTN proporciona una forma estandarizada de multiplexar diferentes tipos de tráfico (como voz, video y datos) en una sola fibra óptica y de administrar y monitorear el rendimiento de la red. Proporciona un servicio de transporte transparente, lo que significa que puede transportar diferentes tipos de tráfico sin requerir ninguna modificación o interpretación de los datos por parte de la red.

Utiliza una estructura jerárquica, siendo las unidades de datos de canal óptico (ODU), que se usan para transportar los datos reales del usuario. Las ODU se agrupan en Unidades de datos de sección de multiplexación óptica (OMS), que se utilizan para la multiplexación y administración de la red.

OTN proporciona funciones para mejorar la confiabilidad de la red, incluida la detección y corrección de errores, la conmutación de protección automática y el monitoreo y la administración de la red. También admite una variedad de velocidades de transmisión, que van desde 2,5 Gbps hasta 400 Gbps. El protocolo OTN se usa ampliamente en las redes de telecomunicaciones, en particular para aplicaciones de larga distancia y alta capacidad, donde las fibras ópticas son el medio de transmisión preferido.

- SONET (Synchronous Optical Network):

Desarrollado en la década de 1980 por Bellcore, estandarizado por ANSI (American National Standards Institute) y luego por ITU-T como Recomendación G.707. Al igual que OTN proporciona una forma estandarizada de multiplexar diferentes tipos de tráfico en una sola fibra óptica y de administrar y monitorear el rendimiento de la red. Utiliza multiplexación por división de tiempo síncrona (TDM) para transmitir múltiples señales a través de una sola fibra a diferentes velocidades, y a cada señal se le asigna un intervalo de tiempo específico en la trama TDM [59].

Admite una variedad de velocidades de transmisión, que van desde 51,84 Mbps hasta 40 Gbps y más, y se puede usar para aplicaciones de corta y larga distancia. También proporciona una variedad de funciones para mejorar la confiabilidad de la red, incluida la detección y corrección de errores, la conmutación de protección automática y el monitoreo y la administración de la red [60].

SONET se ha adoptado ampliamente en las redes de telecomunicaciones, particularmente en América del Norte, y se utiliza a menudo como la base para la transmisión

de datos de alta velocidad. .

- SDH (Synchronous Digital Hierarchy):

Fue desarrollado en Europa en la década de 1980 como respuesta al estándar SONET desarrollado en los Estados Unidos, y ahora está estandarizado por la ITU-T (Unión Internacional de Telecomunicaciones - Sector de Estandarización de las Telecomunicaciones) como Recomendación G.707 [61].

Su diferencia con SONET es que SDH se ha modificado para cumplir con los requisitos específicos de las redes de telecomunicaciones europeas, incluido el uso de diferentes velocidades de transmisión y estructuras de trama. Admite una variedad de velocidades de transmisión, que van desde 155 Mbps a 40 Gbps y más, y se puede utilizar para aplicaciones de corta y larga distancia.

Al igual que SONET, SDH proporciona una variedad de funciones para mejorar la confiabilidad de la red, incluida la detección y corrección de errores, la conmutación de protección automática y la supervisión y administración de la red. Es ampliamente utilizado en redes de telecomunicaciones en Europa y otras partes del mundo, y se utiliza a menudo como columna vertebral para la transmisión de datos de alta velocidad.

Otro tipo de protocolos implicados son los de red, como Ethernet o IP:

- Ethernet:

Protocolo de red ampliamente utilizado que proporciona una forma de conectar dispositivos a través de una red de área local (LAN). Fue desarrollado en la década de 1970 por Xerox Corporation y luego estandarizado por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) como el estándar IEEE 802.3. Utiliza un sistema de tramas para transmitir datos entre dispositivos en una red. Cada cuadro contiene una dirección de origen y de destino, así como los datos reales que se transmiten. Las tramas se transmiten utilizando una variedad de medios físicos, incluidos cables de cobre de par trenzado, cables de fibra óptica y conexiones inalámbricas.

Admite una variedad de velocidades de transmisión, que van desde 10 Mbps hasta 100 Gbps y más. También proporciona una variedad de funciones para mejorar la confiabilidad y el rendimiento de la red, incluida la detección y corrección de errores, el control de flujo y la detección y prevención de colisiones. Se usa ampliamente en las LAN y, a menudo, para conectar dispositivos como computadoras, impresoras y servidores a una red local. Se ha convertido en el estándar para las LAN y ahora se utiliza en una amplia gama de aplicaciones, desde redes domésticas hasta redes empresariales a gran escala [62].

- IP (Internet Protocol):

Utilizado para transmitir datos a través de Internet y otras redes informáticas. Fue desarrollado en la década de 1970 como parte del proyecto ARPANET y ahora está estandarizado por el Grupo de Trabajo de Ingeniería de Internet (IETF) como los estándares IPv4 e IPv6. IP proporciona una forma de enrutar paquetes de datos entre dispositivos en una red, utilizando un sistema de direcciones IP únicas asignadas a cada dispositivo. Las direcciones IP generalmente se representan como una serie de cuatro números separados por puntos, como 192.168.1.1. Cada dispositivo en una red debe tener una dirección IP única para poder comunicarse con otros dispositivos [63].

Los paquetes IP contienen tanto los datos que se transmiten como información sobre el origen y el destino de los datos, incluidas las direcciones IP de los dispositivos de envío y recepción. A medida que los paquetes de datos se transmiten a través de una red, pueden dividirse en paquetes más pequeños, y estos paquetes más pequeños pueden tomar diferentes rutas a través de la red antes de volver a ensamblarse en su destino. Proporciona una gama de funciones para mejorar la confiabilidad y el rendimiento de la red, incluida la fragmentación y el reensamblaje de paquetes, la detección y corrección de errores y el control de flujo. También se utiliza junto con otros protocolos de red, como TCP (Protocolo de control de transmisión) y UDP (Protocolo de datagramas de usuario), para proporcionar una transmisión de datos fiable y eficiente.

IP se utiliza en una amplia gama de aplicaciones, desde simples redes domésticas hasta redes empresariales a gran escala y la propia Internet. Es un componente fundamental de las redes modernas y es esencial para permitir la comunicación entre dispositivos en una red [64].

El incremento de usuarios y la creciente necesidad de ancho de banda han hecho que el protocolo IP haya sido ampliado para soportar los nuevos servicios. Lo que hace la convergencia entre las capas ópticas y la capa IP sea de vital importancia en la expansión de las telecomunicaciones.

Existen varios mecanismo para transportar el tráfico de datos IP sobre DWDM para reducir la sobrecarga de las capas intermedias, normalmente de ATM o SONET/SDH. Sin embargo, ya que no es posible la sustitución de manera rápida de toda la infraestructura implantada, los estudios se centran también en conseguir mecanismos para la integración de todas las capas de esta arquitectura de red heterogénea; proporcionando así una rápida administración de la red y un uso flexible del ancho de banda para el tráfico IP [65].

MPLS es un protocolo utilizado para enrutar el tráfico de red entre diferentes nodos en una red. Fue estandarizado en 1998 por el IEFT (Internet Engineering Task Force) en la RFC



3031 con el objetivo de superar las limitaciones del enrutamiento IP tradicional, Funciona agregando una etiqueta a cada paquete de datos a medida que ingresa a la red para identificar la ruta que debe tomar el paquete a través de esta, según reglas y políticas predefinidas. A medida que el paquete pasa por cada nodo de la red, la etiqueta se usa para enrutar el paquete de manera rápida y eficiente a su destino, sin necesidad de cálculos de enrutamiento IP complejos. Abarca el uso de IPv4 e IPv6 sobre las principales tecnologías orientes a la conmutación de paquetes como Gigabit Ethernet, ATM y Frame Relay. Se consigue mayor integración y complejidad pues los caminos de tráfico o LSP (Label Switch Path), son creados con los mismos protocolos de señalización y de distribución de etiquetas o LDP (Label Distribution Protocol)[65].

A menudo se usa junto con otros protocolos de red, como IP, para crear una red privada virtual (VPN) o cursar tráfico con distintas calidades de servicio o QoS (Quality of Service). También se puede utilizar para mejorar el rendimiento y la confiabilidad de la red al habilitar la ingeniería de tráfico, lo que permite a los administradores de red controlar el flujo de tráfico y optimizar los recursos de la red.

GMPLS (Generalized Multiprotocol Label Switching) es una evolución de MPLS del IETF y O-UNI (Optical User-Network Interface) del OIF (Optical Interface Forum). Soporta tanto conmutación de paquetes como conmutación temporal, en longitud de onda y de fibras ópticas. Abarca, además de routers IP y switches ATM, dispositivos de conmutación tales como: conmutadores digitales de señales multiplexadas en el tiempo o DXC (Digital Cross Connect), conmutadores de longitudes de onda con conversión electroópticas o OXC (Optical Cross Connect) y conmutadores de longitudes de onda totalmente ópticos o PXC (Photonic Cross Connect). Se extienden las funciones de MPLS y se crean nuevas etiquetas generalizadas G-LSP (Generalized LSP), afectando también a los protocolos de encaminamiento y de señalización para la ingeniería de tráfico, la distribución de etiquetas y la protección y restauración de enlaces [65] [66].

Otro concepto a tener en cuenta es la Protección Óptica automática (Automatic Optical Protection Switching, AOPS). Una red óptica con conmutación automática (ASON, Automatically Switched Optical Network) o red óptica de switcheo automático, es un concepto en la evolución de redes de transporte que permite un control dinámico dirigido por políticas en una red óptica o SONET basada en señales entre usuario y los componentes de la red [66].

Su objetivo es automatizar el recurso y la gestión de conexiones dentro de la red. La IETF define el ASON como una alternativa/suplemento a la gestión de conexiones basadas en NMS.

**Hoja 42 de 73**

Utiliza un sistema de conmutación automática para cambiar rápidamente entre enlaces primarios y de respaldo en caso de una falla en el enlace principal. La conmutación se basa en señales de monitoreo continuo de calidad óptica.

En conclusión, la protección de enlaces feeder presenta dos estrategias principales que dependen de la posibilidad de implementar redundancia. En el escenario ideal, donde la redundancia es factible, se recurre a los métodos de diversidad para salvaguardar el enlace. Estos métodos se basan en la utilización de múltiples rutas físicas o lógicas, garantizando así una mayor confiabilidad y disponibilidad del enlace. Sin embargo, en situaciones donde la redundancia no puede ser implementada, es necesario recurrir a los protocolos de restauración para proteger el enlace. Estos protocolos permiten la recuperación rápida y eficiente del enlace en caso de fallos, minimizando así el impacto de las interrupciones en la conectividad. En definitiva, la elección entre diversidad o restauración depende de las condiciones y limitaciones de cada entorno, pero en ambos casos, el objetivo es preservar la integridad y continuidad de las comunicaciones en el enlace feeder.

## 3. Análisis de soluciones para la protección del enlace feeder

El análisis de soluciones de protección para enlaces feeder es fundamental en el diseño y la implementación de redes de comunicaciones confiables y resilientes. Los enlaces feeder son componentes esenciales en la infraestructura de telecomunicaciones, ya que se encargan de transportar grandes volúmenes de tráfico de datos. La pérdida o interrupción de estos enlaces puede impactar significativamente en la calidad del servicio y la experiencia del usuario. Por lo tanto, es crucial examinar de manera exhaustiva las diferentes estrategias y tecnologías disponibles para proteger y garantizar la disponibilidad de los enlaces feeder.

En este análisis, se explorarán las dos principales estrategias de protección, los desafíos asociados a la implementación de estas soluciones y se destacarán las consideraciones clave que deben tenerse en cuenta para lograr una protección efectiva y eficiente de los enlaces feeder.

### 3.1.- Diversidad del site

Como ha sido ampliamente comentado en la literatura, uno de los principales problemas es la atenuación atmosférica debida a condiciones climáticas adversas que rompan la visión directa del enlace, afectando gravemente a servicios de telecomunicaciones que requieren una alta disponibilidad.

Para mitigar este problema en terminales en la superficie de la Tierra, lo primero que se plantea es recibir la señal simultáneamente en otra ubicación en la que en ese momento no haya presencia de nubes que dificulten la comunicación. Esta estrategia consiste en añadir redundancia en el número de terminales receptores, y se conoce como diversidad espacial del site. Esta resolución es la más analizada en la literatura existente, [67], [68], [69] y [70].

También se puede resolver logrando diversidad espacial con la ayuda de múltiples aperturas en un GS único, usando técnicas de combinación apropiadas, tales como combinación de selección, combinación de máximo ratio o de igual ganancia combinando [71] y [72].

Las soluciones de diversidad del site para amortiguar necesitan una distancia mínima de 300 km entre los GW [73] Por lo tanto, es poco probable que las GW estén lo suficientemente separadas entre sí para explotar la diversidad del site y que se encuentren dentro de la huella de un solo satélite LEO. Además, debido a la movilidad de los satélites, no es fácil mantener

mapeos duraderos entre grupos GW redundantes y los satélites LEO correspondientes [74, 75].

Por lo tanto, no podemos usar protocolos de diversidad de GW diseñados para sistemas de satélites GEO. En su lugar, se debe considerar la diversidad del trayecto de alimentación entre GW terrestres y múltiples satélites LEO en la constelación, en contraste con la diversidad del enlace de alimentación entre múltiples GW terrestres y un satélite GEO específico. La solución conlleva adaptar las estrategias anteriores de 1:1, 1+1, etc. y enrutar el tráfico a lo largo de estas rutas.

En primer lugar, se van a estudiar las ventajas y las desventajas de las técnicas de diversidad citadas en el estado del arte, las cuales se pueden adaptar para su uso en comunicaciones ópticas:

■ **Diversidad 1+1:**

Funcionamiento: Consiste en duplicar físicamente el enlace óptico, utilizando dos rutas diferentes. El tráfico se envía simultáneamente por ambas rutas y se selecciona la ruta principal.

Ventajas:

- En caso de falla, se utiliza automáticamente la ruta de respaldo.
- Conmutación instantánea sin pérdida de tráfico.
- Alta confiabilidad y disponibilidad. - Fácil de implementar.

Desventajas:

- Requiere duplicar físicamente todo el enlace, lo que puede ser costoso.
- Ineficiente en términos de utilización de recursos, ya que la ruta de respaldo permanece ociosa en condiciones normales.

■ **Diversidad 1:1:**

Funcionamiento: Similar al 1+1, pero en lugar de duplicar todo el enlace, se utiliza un solo enlace de respaldo que está completamente ocioso hasta que se produce una falla en el enlace principal.

Ventajas:

- Menor costo en comparación con 1+1, ya que solo se necesita un enlace de respaldo.
- Conmutación instantánea sin pérdida de tráfico.

Desventajas:

- Ineficiente en términos de utilización de recursos, ya que el enlace de respaldo permanece ocioso en condiciones normales.

- Mayor tiempo de recuperación en comparación con 1+1, ya que se necesita activar el enlace de respaldo.

■ Diversidad 1:N:

Funcionamiento:

- Permite proteger N enlaces primarios mediante un único enlace de respaldo compartido. Si se produce una falla en uno de los enlaces primarios, se utiliza el enlace de respaldo para mantener la conectividad.

Ventajas:

- Mayor eficiencia en términos de utilización de recursos, ya que varios enlaces primarios comparten un enlace de respaldo.

- Menor costo en comparación con 1+1, ya que se utiliza un solo enlace de respaldo compartido.

Desventajas:-

- Mayor tiempo de recuperación en comparación con 1+1 y 1:1, ya que se necesita activar el enlace de respaldo y puede haber cierta demora en la conmutación.

Finalmente en la Tabla 3.1 se resumen las últimas propuestas y resultados de algunos estudios sobre la diversidad del site aplicada en comunicaciones ópticas satelitales.

Año	Paper	Propuestas y resultados
2021	[48]	Downlink, seleccionar la mejor GS para proporcionar conectividad confiable y diversidad del site. La altitud de la GS y el ángulo cenital son de máxima importancia.
2021	[69]	Downlink con múltiples transmisores y receptores para asignación de potencia óptima. Se propone un algoritmo con muy buenos resultados en tasa de datos y escalabilidad.
2020	[76]	Diversidad del site y reenvío de datos a través de GW no afectada para combatir las pérdidas por fenómenos atmosféricos. Resultados experimentales demuestran que el enfoque SDN/VNF para aliviar la degradación del rendimiento. Algoritmos de aprendizaje de refuerzo para reducir las pérdidas de paquetes y la latencia media con el fin de mejorar la autonomía.
2017	[27]	Técnicas RF buen funcionamiento para comunicación FSO: diversidad, adaptación ópticas, códigos de control de errores, modulación, etc. Carácter complementario con RF para sistemas híbridos.

Tabla 3.1: Adaptación de técnicas de diversidad del site para comunicaciones ópticas por satélite.

### 3.2.- Protocolos y algoritmos de restauración y protección de enlaces

La amplia difusión que han tenido los servicios Ethernet, Internet y de alta velocidad lleva con ella la evolución de la red de transporte hacia las tecnologías de redes ópticas y por paquetes. La red de transporte, capaz de realizar dinámicamente multiplexación, enca-minamiento y transporte de canales ópticos transportando diversas señales del cliente se está convirtiendo en una realidad. Estas nuevas características de las redes se están desarrollando para mejorar las capacidades de gestión, las oportunidades de expansión del servicio y la optimización del transporte de tráfico IP y otros tráficos de datos [77].

En la Tabla 3.2 se resumen las principales ventajas y desventajas de los protocolos involucrados en en la restauración de enlaces explicados en el estado de arte.

Protocolo	Descripción	Ventajas	Desventajas
SONET/SDH	Protocolo tradicional basado en circuitos	Alta confiabilidad y baja latencia	Requiere infraestructura costosa
OTN	Evolución de SONET/SDH con soporte de multiplexación de paquetes	Mayor capacidad y flexibilidad	Mayor complejidad y costos
MPLS	Protocolo de conmutación de etiquetas	Alta escalabilidad y flexibilidad	Requiere equipos compatibles con MPLS
PBB-TE	Protocolo Ethernet para transporte de tráfico MPLS	Mayor eficiencia en redes Ethernet	Limitado a redes Ethernet
ASON/GMPLS	Protocolo basado en control de recursos ópticos	Soporte para asignación dinámica de recursos	Mayor complejidad y configuración

Tabla 3.2: Resumen protocolos de restauración de enlace.

En la ampliación de 2022 de [77] se expresa la importancia de coordinar la normalización de los temas siguientes:

- Redes SDH.
- Redes OTN.
- Redes de transporte por paquetes, en particular Ethernet y T-MPLS.
- Gestión y control de redes, incluidas la ASON (red óptica con conmutación automática).

Las características de la ASON, según los requisitos estipulados en la Recomendación G.8080, consta de: gestión distribuida de la conexión; detección automática; selección del camino óptico; y control de acceso a la conexión.

Por otro lado, la restauración de enlaces ópticos es un aspecto crítico en las redes de comunicaciones, especialmente en entornos donde la fiabilidad y la disponibilidad son fundamentales. En este contexto, los algoritmos de conmutación desempeñan un papel clave al

determinar cómo se restablece el flujo de datos cuando se produce una interrupción en un enlace óptico. Estos algoritmos están diseñados para identificar rutas alternativas y seleccionar la mejor opción para redirigir el tráfico y restaurar la conectividad de manera eficiente.

Existen varios algoritmos de conmutación que se pueden utilizar para la protección del enlace de feeder óptico. Algunos de los más comunes son:

- **Conmutación por umbral de potencia (Threshold-based Switching):** Este algoritmo monitorea continuamente la potencia óptica del enlace principal y compara su nivel con un umbral predefinido. Si la potencia cae por debajo del umbral, se activa automáticamente el enlace de respaldo.

Ventajas:

- Simple y fácil de implementar.
- La conmutación se activa rápidamente cuando la potencia óptica cae por debajo del umbral.

Desventajas:

- No tiene en cuenta otros parámetros de calidad óptica que podrían afectar el rendimiento del enlace.
- Puede haber falsos positivos o falsos negativos si el umbral no se configura adecuadamente.

- **Conmutación basada en tiempo (Time-based Switching):** En este algoritmo, se establece un temporizador que mide el tiempo transcurrido desde el último evento de conmutación. Si el enlace principal experimenta una interrupción durante un período de tiempo predefinido, se activa el enlace de respaldo.

Ventajas:

- Permite establecer un tiempo predefinido para activar la conmutación, independientemente de las variaciones en la potencia óptica.
- Puede ser útil para detectar errores intermitentes en el enlace principal.

Desventajas:

- Puede resultar en una conmutación innecesaria si se configura un tiempo demasiado corto.
- No tiene en cuenta la calidad óptica real del enlace principal.

- **Conmutación por monitorización de calidad óptica (Optical Quality Monitoring Switching):** Este algoritmo utiliza información sobre la calidad óptica del enlace principal,

**Hoja 48 de 73**

como la atenuación, la dispersión y el ruido, para determinar su estado. Si se detecta una degradación significativa en la calidad óptica, se activa el enlace de respaldo.

Ventajas:

- Permite una detección más precisa de problemas en el enlace principal, considerando parámetros como la atenuación, la dispersión y el ruido.

Mayor probabilidad de activar la conmutación solo cuando sea necesario.

Desventajas:

- Requiere equipos y algoritmos más complejos para monitorear y analizar la calidad óptica.

- Puede haber cierta latencia en la detección y conmutación.

- **Conmutación basada en conmutación rápida (Fast Switching):** Este algoritmo utiliza técnicas de conmutación rápida, como la pre-conmutación, para minimizar el tiempo de conmutación en caso de falla del enlace principal. Se activa el enlace de respaldo antes de que se produzca una interrupción completa en el enlace principal, asegurando una transición casi instantánea sin pérdida de tráfico.

Ventajas:

- Minimiza el tiempo de conmutación, asegurando una transición casi instantánea sin pérdida de tráfico.

- Puede anticiparse a fallos completos en el enlace principal mediante la activación temprana del enlace de respaldo.

Desventajas:

- Requiere una infraestructura de red y equipos compatibles con la conmutación rápida.

- Puede implicar un mayor costo debido a la necesidad de dispositivos y circuitos de conmutación adicionales.

- **Conmutación por monitorización de señal (Signal Monitoring Switching):** En este algoritmo, se monitorea continuamente la señal óptica del enlace principal para detectar cambios o anomalías. Si se detecta una señal anormal, se activa el enlace de respaldo.

Ventajas:

- Permite detectar cambios o anomalías en la señal óptica, incluso si la potencia óptica se mantiene dentro de los límites.

- Proporciona una detección más completa de problemas en el enlace principal.



Desventajas:

- Requiere un monitoreo constante y análisis de la señal óptica, lo que puede requerir equipos y algoritmos más complejos.
- Puede haber cierta latencia en la detección y conmutación.

La elección del algoritmo de conmutación depende de diversos factores, como la tolerancia a la interrupción del servicio, la velocidad de conmutación requerida, la infraestructura de red existente y los equipos utilizados.

Un ejemplo para lograr alta confiabilidad y estabilidad de red es la conmutación de protección de anillo Ethernet (ERPS)[77] Los vínculos en el anillo nunca formarán bucles que afecten fatalmente el funcionamiento de la red y la disponibilidad de los servicios. La idea básica de un anillo Ethernet es usar un vínculo específico para proteger todo el anillo. Este vínculo especial se denomina vínculo de protección de anillos (RPL). Si no se produce ningún fallo en otros vínculos del anillo, la RPL bloquea el tráfico y no se utiliza. La RPL está controlada por un nodo especial llamado propietario de RPL. Solo hay un propietario de RPL en un anillo. El propietario de la RPL es responsable de bloquear el tráfico sobre la RPL. En condiciones de falla de anillo, el propietario de la RPL es responsable de desbloquear el tráfico a través de la RPL. Un fallo en el anillo da como resultado la conmutación de protección del tráfico de RPL. Se utiliza un protocolo de conmutación de protección automática (APS) para coordinar las acciones de protección sobre el anillo. La conmutación de protección bloquea el tráfico en el vínculo fallido y desbloquea el tráfico en la RPL. Cuando se borra el error, la conmutación de protección revertiva bloquea el tráfico de la RPL y desbloquea el tráfico en el vínculo en el que se borra la falla.

### 3.3.- Modulación

En las comunicaciones ópticas por satélite, se utilizan diversas técnicas de modulación, las cuales son fundamentales para codificar los datos adecuadamente y permitir su transmisión y posterior recuperación en la estación receptora.

Las técnicas de modulación seleccionadas para usar en los enlaces feeder con láser son:

- OOK (On-Off Keying):

Modulación que utiliza una única señal óptica portadora que se enciende o apaga para representar los bits de información. La amplitud de la señal óptica se modula direc-

tamente con la información digital a transmitir. El bit "1" se representa mediante la presencia de luz, mientras que el bit "0" se representa mediante la ausencia de luz.

Aunque tiene una baja eficiencia espectral y es más susceptible al ruido que otras modulaciones, es adecuada para aplicaciones de corto alcance donde la simplicidad y el bajo coste son más importantes que la capacidad de transmisión de datos de alta velocidad [78].

- PPM (Pulse Position Modulation):

Esquema de modulación utilizado en sistemas de comunicaciones para transmitir información digital mediante la posición temporal de los pulsos de luz. Cada símbolo o bit de información se representa mediante un pulso óptico en una posición específica dentro de un intervalo de tiempo discretizado. La posición del pulso dentro del intervalo de tiempo indica el valor del bit o símbolo transmitido.

Ofrece una alta eficiencia espectral y gran capacidad de transmisión de datos, aunque puede ser sensible al ruido y requerir una sincronización precisa. Se utiliza en aplicaciones de comunicaciones ópticas de alta velocidad, como las redes de fibra óptica y las comunicaciones ópticas inalámbricas o en comunicaciones del espacio profundo. Es relativamente robusta frente a la distorsión del frente de onda debida a la turbulencia atmosférica o al centelleo. [79] [80]

- DPPM (Double Pulse Position Modulation):

Se trata de una modificación de PPM que puede lograr una mejora de eficiencia de potencia y/o de ancho de banda. En [81] encuentran que DPPM siempre logra una mayor eficiencia energética y menor complejidad de hardware que PPM, lo cual la hace una candidata favorable para reemplazar PPM en muchas aplicaciones [80].

- DPIM (Differential Phase-Shift Keying with Intensity Modulation):

La Modulación de Intensidad con Desplazamiento Diferencial de Fase es un esquema de modulación óptica en el que se combinan dos técnicas de modulación: la modulación de intensidad (IM) y el desplazamiento diferencial de fase (DPSK). La modulación de intensidad implica variar la amplitud de la señal óptica portadora para representar la información, mientras que el desplazamiento diferencial de fase modifica la fase de la señal en relación con la fase anterior.

La principal característica del DPIM es su capacidad para mitigar los efectos de la atenuación de la fibra óptica y reducir la interferencia causada por el ruido. La combinación de la modulación de intensidad y el desplazamiento diferencial de fase permite un alto rendimiento en términos de capacidad de transmisión y calidad de la señal.

Además, su robustez, tolerancia al ruido y eficiencia espectral hacen que sea una opción popular en las comunicaciones ópticas de alta velocidad [82].

- **DH-PIM (Dual-Header Pulse Interval Modulation):** Esquema de modulación de intervalo de pulso de cabezal dual (DH-PIM) para comunicaciones ópticas inalámbricas.

Los resultados obtenidos muestran que DH-PIM ofrece mayor capacidad de transmisión que PPM y PIM. En comunicaciones inalámbricas ópticas que exigen una capacidad de transmisión aún mayor y un ancho de banda de transmisión más bajo que el de PPM y DPPM, la modulación de intervalo de pulso de encabezado dual (DH-PIM) podría ser una buena opción si se ve comprometida una ligera degradación en el rendimiento de error en comparación con PPM y DPPM. También ofrece un diseño de receptor más simple debido a su capacidad inherente de sincronización de cuadros como DPPM [83].

En [84] se compara su rendimiento con otros esquemas de modulación OOK, PPM, DPPM y la modulación de intervalo de pulso digital (PIM). Muestran que DH-PIM ofrece una tasa de bits más alta y tiene capacidad de sincronización incorporada. Para un receptor detector de umbral simple, ofrece un rendimiento de error mejorado en comparación con OOK, pero un rendimiento marginalmente inferior en comparación con PPM. El rendimiento óptimo del sistema en términos de potencia óptica y requisitos de ancho de banda se logra con una resolución de 5 bits.

PPM ofrece el mejor rendimiento y eficiencia energética, pero requiere un alto ancho de banda de transmisión y una implementación compleja del sistema. Por otro lado, PIM mejora la tasa de bits de transmisión al eliminar las ranuras vacías que siguen al pulso como en PPM a costa de una mayor tasa de error y una potencia promedio más alta, y ofrece capacidades de autosincronización. DH-PIM ofrece una tasa de bits de transmisión aún más alta y tiene menos requisitos de ancho de banda en comparación con PPM y PIM, pero a costa de un rendimiento de error reducido y una potencia óptica promedio aumentada [85].

- **PSK (Phase Shift Keying):** Es una técnica de modulación utilizada en las comunicaciones digitales para transmitir información a través de cambios discretos en la fase de una señal portadora.

En PSK, se utiliza un conjunto de fases discretas para representar los diferentes símbolos o bits de información. Cada símbolo se asocia con una fase específica, y la señal portadora se desplaza a estas fases para transmitir la información. Existen varios tipos de PSK en función del número de símbolos: BPSK, QPSK o 8-PSK. La gran ventaja de las modulaciones PSK es que la potencia de todos los símbolos es la misma, por lo que se simplifica el diseño de los amplificadores y etapas receptoras lo que significa

**Hoja 52 de 73**

reducción de costos, dado que la potencia de la fuente es constante. Ofrece una buena eficiencia espectral y además BPSK y QPSK son muy robustas para la protección frente a errores [86].

En la Tabla 3.3 se resumen las modulaciones u con su potencia de transmisión, ancho de banda y probabilidad de error.

Modulation	Average Transmit Power	Bandwidth (BW)	BER ( $P_e$ )
OOK	$P_{OOK} = P/2$	$BW_{OOK} = R_b$	$P_{e,OOK} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{S_t}/2\sigma_n^2}{2}\right)$
PPM	$P_{PPM} = \frac{P}{2M}$	$BW_{PPM} = \frac{2^M}{M} R_b$	$P_{e,PPM} = \frac{1 + \operatorname{erf}[(b - \sqrt{S_t})/\sqrt{2\sigma_n^2}] + (2^M - 1)[1 - \operatorname{erf}(b/\sqrt{\sigma_n^2})]}{2^{M+1}}$
DPPM	$P_{DPPM} = \frac{2P}{(2^M + 1)}$	$BW_{DPPM} = \frac{2^M + 1}{2M} R_b$	$P_{e,DPPM} = \frac{1 + \operatorname{erf}[(b - \sqrt{S_t})/\sqrt{2\sigma_n^2}] + (2^M - 1)[1 - \operatorname{erf}(b/\sqrt{\sigma_n^2})]}{2^{M+1}}$
DPIM	$P_{DPIM} = \frac{2P}{(2^M + 3)}$	$BW_{DPIM} = \frac{2^M + 3}{2M} R_b$	$P_{e,DPIM} = \frac{1 + \operatorname{erf}[(b - \sqrt{S_t})/\sqrt{2\sigma_n^2}] + (2^M + 1)[1 - \operatorname{erf}(b/\sqrt{\sigma_n^2})]}{2^{M+3}}$
DH-PIM	$P_{PIM} = \frac{3\alpha P}{2(2^{M-1} + 2\alpha + 1)}$	$BW_{DH-PIM} = \frac{2^{M-1} + 2\alpha + 1}{2M} R_b$	$P_{e,DH-PIM} = \frac{(3\alpha/2)(1 + \operatorname{erf}[(b - \sqrt{S_t})/\sqrt{2\sigma_n^2}]) + (4L_m - 3\alpha)/2[1 - \operatorname{erf}(b\sqrt{\sigma_n^2})]}{4L_m}$
PSK	$P_{PSK} = P$	$BW_{PSK} = R_b$	$P_{e,PSK} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{S_t}{2\sigma_n^2}}\right)$

Tabla 3.3: Modulaciones utilizadas en comunicaciones ópticas.

Siendo  $P$  la potencia transmitida,  $M$  el número de símbolos de la constelación,  $\alpha$  se utiliza en la modulación DH-PIM y representa el factor de forma de la señal en la modulación y está relacionado con el ancho de los pulsos en la señal modulada,  $S_t$  representa la energía de la señal transmitida y se utiliza para determinar la probabilidad de error en la recepción de los símbolos transmitidos en las modulaciones mencionadas y  $\sigma_n^2$  representa la varianza del ruido en el sistema de comunicación  $b$  se utiliza para determinar si un símbolo transmitido se interpreta como un '0' o un '1' en el receptor. La función de distribución de error (erf) se utiliza para calcular la probabilidad de error de bit (BER) en función de la relación señal-ruido (SNR) y este umbral de detección  $b$ .

Además, otras técnicas más evolucionadas basadas en esquemas no coherentes que permiten mejorar la variabilidad del canal a causa del efecto Doppler de los satélites LEO son investigadas en [87, 88, 89]. Estas técnicas son un reto interesante para las comunicaciones ópticas en el enlace feeder. El rendimiento mostrado en el análisis de [90, 91] es prometedor para mejorar las modulaciones clásicas. La modulación PSK en su formato diferencial es el candidato para esta evolución en la literatura.

## 4. Análisis técnico

El análisis técnico se centrará en la evaluación de las prestaciones de las técnicas existentes para modulación óptica y en la evaluación de la diversidad del site, lo que proporcionará información relevante para comprender y mejorar los enlaces de alimentación ópticos en sistemas satelitales.

En el contexto del análisis técnico, adquiere importancia la regulación en emisión láser, a tener en cuenta en las técnicas de modulación ópticas utilizadas en los enlaces de alimentación. Dado que las emisiones láser pueden ser peligrosas para la salud humana y la seguridad, es necesario considerar y cumplir con las regulaciones pertinentes.

### 4.1.- Balance de enlace

Los enlaces de conexión por satélite pueden operar en un amplio rango de bandas de frecuencia, pero las utilizadas en comunicaciones por satélite son la banda Ku, la banda Ka y la banda Q. La elección de la banda de frecuencia depende de factores como la tasa de datos deseada, la distancia de transmisión y la disponibilidad de espectro.

Las frecuencias utilizadas en las comunicaciones ópticas por satélite pueden variar según la aplicación específica y la tecnología utilizada. Además, las frecuencias utilizadas en las comunicaciones ópticas por satélite están sujetas a regulaciones internacionales y pueden requerir licencias para su uso.

Para las comunicaciones ópticas por satélite se utilizan las siguientes bandas de frecuencia, resumidas en la Tabla 4.1.

Banda de frecuencia	Rango de longitud de onda [nm]	Aplicaciones
UV	10-400	Investigación científica
Visible	400-700	Comunicaciones a corta distancia
Near-Infrared (NIR)	700-1100	Comunicaciones a media distancia
Short-Wavelength Infrared (SWIR)	1100-2500	Detección remota, vigilancia, exploración geológica
Mid-Wavelength Infrared (MWIR)	2500-5000	Detección remota, vigilancia, exploración geológica
Long-Wavelength Infrared (LWIR)	8000-12000	Detección remota, vigilancia, exploración geológica

Tabla 4.1: Bandas de frecuencia en comunicación satelital óptica.

Un feeder link óptico satelital utiliza longitudes de onda ópticas, generalmente en la región del infrarrojo cercano, para transmitir datos entre una estación terrestre y un satélite de comunicaciones. A diferencia de los enlaces de alimentación de radiofrecuencia (RF) tradicionales, que operan en las bandas de microondas, los enlaces de alimentación ópticos tienen el potencial de ofrecer velocidades de datos mucho más altas y una latencia menor.

### Hoja 54 de 73

Como se demostró con el láser LCRD de la NASA, al ser los rayos muy estrechos y enfocados, se permite una comunicación punto a punto de alta velocidad. Sin embargo, pueden verse afectados por las condiciones atmosféricas, como nubes y turbulencias, que pueden causar atenuación y dispersión de la señal

Además de obtener un mayor ancho de banda, utilizar un feeder link óptico presenta otras ventajas sobre los enlaces de RF, como un menor consumo de energía y una mayor seguridad. RF-SatCom es propenso a interferencias, atascos e intercepciones, que plantean riesgos de seguridad, especialmente para las comunicaciones militares.

Sin embargo, también tienen algunos desafíos, como la necesidad de apuntar y rastrear con precisión el rayo láser, así como técnicas robustas de corrección de errores y compresión de datos para hacer frente a los efectos de la turbulencia atmosférica.

En los enlaces intersatélite, los haces se propagan sin atenuación y desvanecimiento debido a que el medio de propagación es el vacío, en cambio en el uplink y el downlink deben atravesar la atmósfera, lo que provoca atenuación y desvanecimiento debido a la dispersión y el centelleo, y la potencia de transmisión requerida debe ajustarse en consecuencia para compensar la pérdida causada por la atmósfera. La dispersión se define generalmente como la redirección de energía del haz por partículas presentes a lo largo del camino de propagación. En [8], consideran la dispersión de Mie y la dispersión geométrica para modelar la atenuación atmosférica, ya que son las fuentes principales de dispersión del haz y por lo tanto, el haz se desvanece en la atmósfera.

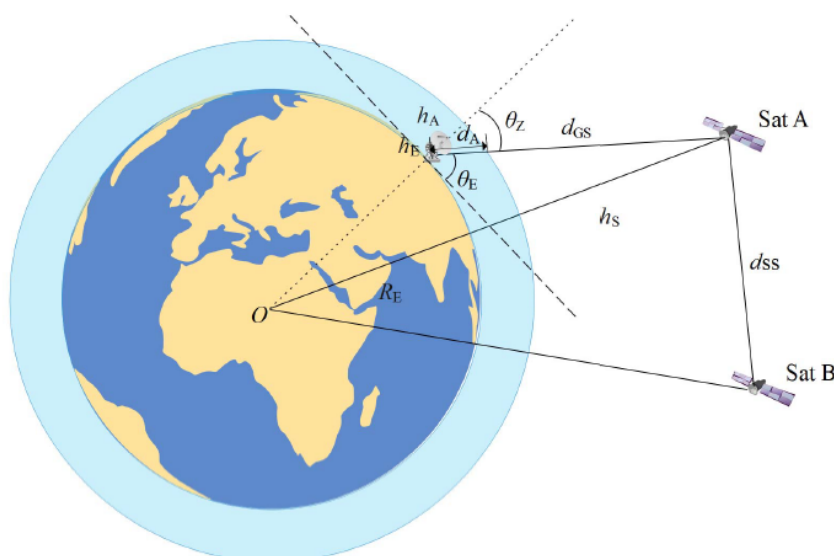


Figura 4.1: Representación geométrica de parámetros para enlace entre satélites y comunicación óptica de enlace ascendente/descendente[8].

Para modelar enlaces ascendentes y descendentes ópticos, debe considerarse la atenuación atmosférica y la potencia recibida es dada por la expresión:

$$P_r = P_T \cdot \eta_T \cdot \eta_R \cdot G_T \cdot G_R \cdot L_T \cdot L_R \cdot L_A \cdot L_{PG} \quad (4.1)$$

Donde  $P_R$  es la potencia óptica recibida,  $P_T$  es la potencia óptica de transmisión,  $\eta_T$  es la eficiencia óptica de transmisión,  $\eta_R$  es la eficiencia óptica de recepción,  $G_T$  la ganancia de la antena transmisora,  $G_R$  la ganancia de la antena receptora,  $L_T$  las pérdidas por apuntamiento del transmisor,  $L_R$  las pérdidas por apuntamiento del receptor,  $L_A$  la atenuación atmosférica y  $L_{PG}$  las pérdidas por espacio libre en el trayecto para enlaces entre estaciones terrestres y los satélites

La distancia de inclinación  $d_{GS}$  (distancia entre la estación terrena y el satélite viene dada por:

$$d_{GS} = R \sqrt{((R+H)/R)^2 - (\cos(\theta_E))^2 - \sin(\theta_E)} \quad (4.2)$$

Donde  $R = R_E + h_E$  y  $H = h_S - h_E$ .

Las pérdidas por espacio libre  $L_{PG}$  se pueden expresar en función de la distancia oblicua como:

$$L_{PG} = (\lambda/4\pi d_{GS})^2 \quad (4.3)$$

Se va a considerar la altitud de la estación terrestre para modelar escenarios prácticos, puesto que en casos reales las estaciones terrestres son ubicadas principalmente en lugares altos en la superficie de la superficie terrestre.

1. Atenuación atmosférica debido a la dispersión de Mie: La dispersión de Mie ocurre cuando el diámetro de la atmósfera partículas es igual o mayor que la longitud de onda de la haz óptico. Se presenta principalmente en la parte inferior de la atmósfera donde las partículas más grandes son más abundantes, y es causada principalmente por partículas microscópicas de agua. La siguiente expresión, que puede modelar con precisión el Mie el efecto de dispersión, es aplicable para estaciones terrestres ubicadas en altitudes entre 0 y 5 km sobre el nivel medio del mar:

$$\rho = a(h_E)^3 + b(h_E)^2 + c_{h_E} + d, \quad (4.4)$$

Donde  $\rho$  es el radio,  $h_E$  es la altura de la estación terrena en km, y  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$  coeficientes independientes de la longitud de onda, los cuales se pueden expresar como  $a = -0,000545\lambda^2 + 0,002\lambda - 0,0038$ ,  $b = 0,00628\lambda^2 - 0,0232\lambda + 0,00439$ ,  $c = -0,028\lambda^2 + 0,101\lambda - 0,18$ ,  $d = -0,228\lambda^3 + 0,922\lambda^2 - 1,26\lambda + 0,719$ , y la atenuación atmosférica debida a la dispersión de Mie se puede expresar como:

$$I_m = \exp(-\rho/\sin(\theta_E)) \quad (4.5)$$

donde  $\theta_E$  es el ángulo de levación de la estación terrestre en grados.

2. Atenuación atmosférica debida a la dispersión geométrica: La dispersión geométrica se utiliza para modelar la atenuación debida a la atmósfera cercana a la superficie de la Tierra y es causada por niebla o nubes densas. En este modelo, la siguiente expresión muestra el efecto de la dispersión geométrica:

$$V = 1,002/(LWN)^{0,6473} \quad (4.6)$$

Donde  $V$  es la visibilidad en km,  $LW$  es el contenido de agua líquida en  $g/m^{-3}$  y  $N$  es la concentración del número de nubes en  $cm^{-3}$

El coeficiente de atenuación  $\theta_A$  se puede expresar como:

$$\theta_A = (3,91/V)(\lambda/550)^{-\varphi} \quad (4.7)$$

donde  $-\varphi$  es el coeficiente relacionado con el tamaño de partícula dado según el modelo de Kim [45]. La ley de Beer-Lambert se da como  $I(z) = \exp(-\mu z)$ , donde  $\mu$  es el coeficiente de atenuación que depende de la longitud de onda y  $z$  es la distancia de la ruta de transmisión [49].

Para la dispersión geométrica, la atenuación atmosférica puede expresarse usando la ley de Beer-Lambert:

$$I_g = \exp(-\theta_A d_A) \quad (4.8)$$

Donde  $d_A$  es la distancia del haz óptico a través de la capa de troposfera de la atmósfera sobre la que se encuentra dispersión geométrica, y se puede expresar en base a la ángulo cenital (es decir, el ángulo entre la perpendicular a la superficie de la Tierra, que se muestra como una línea punteada en la Figura 4.1, y el enlace entre la estación



terrestre y el satélite Sat A)  $\theta_z$  como  $d_A = (h_A - h_E)\sec(\theta_z)$  [92], y también se puede calcular usando el ángulo de elevación  $\theta_E$  como  $d_A = (h_A - h_E)\csc(\theta_E)$ , donde  $h_A$  es la altura de la capa troposfera de la atmósfera en km,  $h_E$  es la altitud de la estación terrestre en km, y  $\theta_E = 90^\circ - \theta_z$ .

Las pérdidas por atenuación atmosférica considerando tanto la dispersión de Mie y la dispersión geométrica [10] se puede calcular como:

$$L_A = I_m I_g = \exp(-\rho / \sin(\theta_E)) \exp(\theta_A d_A) \quad (4.9)$$

El rendimiento de un sistema de comunicación óptica es comúnmente evaluado en términos de margen de enlace y tasa de error de bit. El margen de enlace se define como la relación entre la potencia recibida y la potencia requerida que se necesita para lograr una tasa de error de bit específica a una tasa de datos dada.

El enlace necesita dicho margen para contrarrestar pérdidas y ruidos inesperados, y debe ser siempre positivo para garantizar que la señal se puede recibir correctamente. El margen del enlace puede ser modelado de la siguiente forma:

$$LM = P_R / P_{req} \quad (4.10)$$

Donde  $P_R$  es la potencia recibida en  $mW$  y  $P_{req}$  es la sensibilidad del receptor en  $mW$  [93].

## 4.2.- Modulaciones

En la Figura 4.2 se van a representar la potencia para las distintas modulaciones tratadas en la sección 3.

En las modulaciones PPM, DPPM, DPIM y DH-PIM la potencia de transmisión promedio disminuye a medida que aumenta  $M$ . Esto se debe a que la potencia se distribuye entre más niveles o pulsos, lo que resulta en una potencia promedio más baja para cada nivel o pulso individual. Por otro lado, el ancho de banda requerido aumenta a medida que aumenta  $M$ . Esto quiere decir que requiere una mayor capacidad de transmisión para acomodar la información adicional.

Por otro lado, para OOK, la potencia se divide por 2 para generar la señal modulada,

mientras que en PSK, la potencia total se utiliza directamente. En estas modulaciones, el ancho de banda requerido se mantiene constante sin importar el valor de  $M$ , por lo tanto el número de símbolos no afecta directamente al ancho de banda.

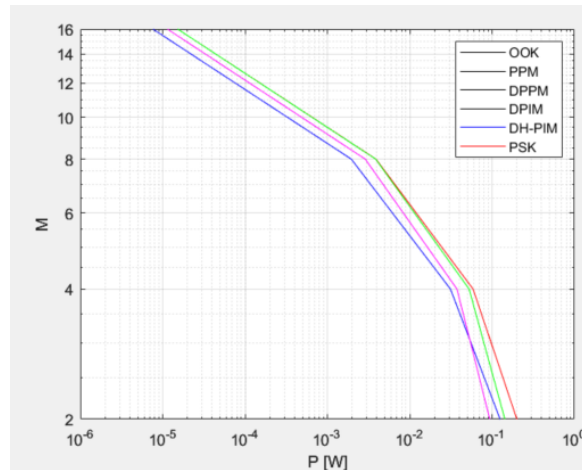


Figura 4.2: Potencia de las modulaciones OOk, PPM, DPPM,DPIM y DH-PIM para variando el parámetro  $M$ .

En resumen, en el caso de las modulaciones PPM, DPPM, DPIM y DH-PIM, el parámetro  $M$  influye en el cálculo del ancho de banda y la tasa de bits. A medida que  $M$  aumenta, se pueden transmitir más símbolos o información en cada intervalo de tiempo, lo que resulta en una mayor capacidad de transmisión, pero también puede implicar una mayor complejidad de diseño y una mayor sensibilidad a ruido e interferencias.

En la Figura 4.3 se recogen los presupuestos de enlace de haz para el enlace ascendente de la puerta de enlace (banda Ka superior) para SpaceX, OneWeb y Telesat [9]. Las tres constelaciones tratadas utilizan la modulación PSK para el gateway uplink.

En [9] concluyen que el rendimiento total máximo del sistema para OneWeb, Telesat y SpaceX son 1,56 Tbps, 2,66 Tbps y 23,7 Tbps respectivamente. Por otro lado, en el segmento terrestre con 42 estaciones terrestres será suficiente para manejar toda la capacidad de Telesat, mientras que OneWeb necesitará al menos 71 terrenos estaciones y SpaceX más de 123. En términos de eficiencia satelital del Sistema de Telesat es mejor que la competencia con aproximadamente 59 % frente al 25 % de SpaceX y el 22 % de OneWeb.

<i>Parameter</i>	<i>Telesat</i>	<i>OneWeb</i>	<i>SpaceX</i>	
<i>Frequency *</i>	28.5	28.5	28.5	GHz
<i>Bandwidth *</i>	2.1	0.25	0.5	GHz
<i>Tx. Antenna D *</i>	3.5	2.4	3.5	m
<i>EIRP</i>	75.9	63.2	68.4	dBW
<i>MODCOD</i>	64APSK 3/4	256APSK 32/45	256APSK 3/4	-
<i>Roll-off factor</i>	0.1	0.1	0.1	-
<i>Spectral eff.</i>	4.1	5.1	5.4	bps/Hz
<i>Path distance *</i>	2439	1504	1684	km
<i>Elevation Angle *</i>	20	55	40	deg
<i>FSPL</i>	189.3	185.1	186.1	dB
<i>Atmospheric loss</i>	4.8	2.3	2.9	dB
<i>Rx antenna gain *</i>	31.8	37.8	40.9	dBi
<i>System Temp.</i>	868.4	447.2	535.9	K
<i>G/T *</i>	2.4	11.3	13.6	dB/K
<i>Rx C/N0</i>	25.6	32.5	32.4	dB
<i>Rx C/ACI</i>	27	27	27	dB
<i>Rx C/ASI</i>	23.5	27	27	dB
<i>Rx C/XPI</i>	25	25	25	dB
<i>HPA C/3IM</i>	25	30	30	dB
<i>Rx Eb/(N0 + I0)</i>	11.4	13.3	13.3	dB
<i>Req. Eb/N0</i>	11.0	12.3	12.3	dB
<i>Link Margin</i>	0.36	1.03	1.02	dB
<i>Data rate</i>	9857.1	1341.1	2682.1	Mbps
<i>Shannon limit</i>	1.09	1.06	1.06	dB

Figura 4.3: Presupuestos de enlace de haz para el enlace ascendente de la puerta de enlace (banda Ka superior) para los tres sistemas considerados en [9].

### 4.3.- Diversidad

Se van a presentar varios escenarios para un servicio de comunicaciones de banda ancha con un satélite multibeam de alto rendimiento en órbita GEO para la región europea de  $10.530.751 \text{ km}^2$  mediante haces circulares de  $0.1^\circ$  de ángulo de visión. Se encuentra a una distancia de 37.000 km del punto subsatelital y opera en banda Ka (26.5-36.5 GHz).

Tanto el enlace return como el forward con los gateways (GW) cuentan con un ancho de banda de 3 GHz, mientras que los enlaces con los usuarios cuentan con un ancho de banda de 1 GHz. La carga útil o payload del HTS actúa de repetidor para dos polarizaciones circulares ortogonales a izquierdas (LHCP) y derechas (RHCP) con canalizaciones de 500 MHz en FDMA-SCPC y banda de guarda entre enlaces equivalentes a un canal.

En el segmento terrestre se utiliza una redundancia 2:1 para los GW, que apuntan al HTS entre  $3$  y  $7^\circ$  de elevación. Para mejorar la fiabilidad del HTS, la payload utiliza receptores con redundancia 4:2 para cada polarización y downconverter híbridos. Se emplean multiplexores de entrada y salida que canalizan el ancho de banda a canales de banda estrecha. Se emplean amplificadores TWTs de 7W protegidos con un anillo de redundancia de 14:12 basado en T-switches y que amplifican los canales activos en los transponders. La payload además utiliza una señal beacon en RHCP generada por un oscilador local y amplificada con redundancia

2:1. Las señales emplean DVB-S2X con esquema QPSK y codificador 1/2 para conseguir el alto throughput de un HTS.

Además, las redes 5G ofrecen servicios que requieren niveles de latencia muy bajos que son complicados de ofrecer con enlaces GEO. Por ello, se desea que el sistema también disponga de satélites en otras órbitas como LEO dando lugar a una constelación híbrida que cubra la misma región europea.

En la Figura 4.4 se muestra el esquema de la payload citada para el satélite HTS.

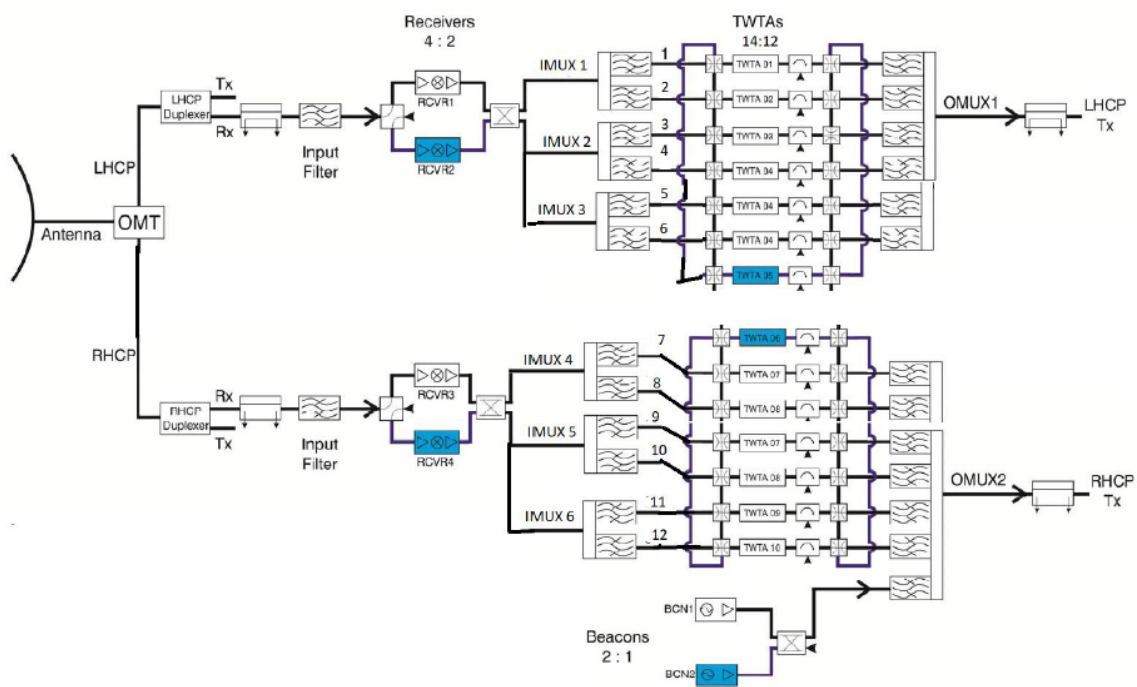


Figura 4.4: Esquemático de la Payload para el satélite HTS.

Para calcular el número de gateways necesarios para dar soporte a todos los beams se utilizará la siguiente fórmula:

$$N^o GW = \frac{Beams}{Canales_{payload}} \tag{4.11}$$

Se redondea el número al entero superior y para conseguir redundancia doble se realiza lo siguiente:

$$Redundancia_{2:1} = N^{\circ}GW \cdot 2 \quad (4.12)$$

En la Tabla 4.2 se recogen los resultados para varias constelaciones de satélites conocidas.

Constelación	Tipo de órbita	Nº Satélites	Beams de cada satélite	Redundancia doble (nº gateways)
O3b mPOWER	MEO	11*	< 5000	834
Iridium NEXT	GEO	66	48	8
Global Xpress	GEO	5	89	16
SpaceX	LEO	4425	9	2
OneWeb	LEO	720	16	4
Telesat	LEO	117	1	2

Tabla 4.2: Gateways necesarios para dar soporte a todos los beams de las constelaciones citadas asumiendo 12 canales de la payload [11][12][13] [9]

Se observa que en el caso de los GEO analizados, necesitaríamos gateways 8 para la constelación Iridium NEXT y 16 para Global Express. Por ejemplo, los haces de Iridium NEXT tienen 400 km de diámetro de haz, lo que le da una cobertura total de  $4500 \text{ km}^2$ . El diámetro que proporciona el haz de satélite está relacionado con el concepto de densidad satelital, que hace referencia a la cantidad de satélites que operan en una determinada región. Por ejemplo, en órbitas LEO, la densidad puede ser alta, ya que se utilizan múltiples satélites trabajando juntos para proporcionar cobertura global o regional. En contraste, en órbitas GEO, la densidad satelital tiende a ser más baja, ya que los satélites se deben estar más espaciados para evitar interferencias. Es importante destacar que en las constelaciones LEO para mitigar el bloqueo de la nube, las soluciones de diversidad de sitios necesitan una distancia mínima de 300 km entre los GW.

La constelación O3b mPOWER cuenta con 5000 haces direccionables, utiliza tecnología de haz múltiple y capacidad de reconfiguración dinámica para adaptarse a las necesidades cambiantes de conectividad. Cada satélite tiene una serie de haces que pueden dirigirse a diferentes áreas de la Tierra, lo que permite una cobertura amplia y flexible. Además, los satélites pueden ajustar la asignación de capacidad entre diferentes áreas según la demanda, lo que brinda una mayor eficiencia en el uso de los recursos satelitales. Aunque cuenta con 11 satélites, con 6 consigue una cobertura global.

Por otro lado, en [9] comentan que para lograr una cobertura total OneWeb requiere 61 estaciones terrestres, mientras que los sistemas de Telesat y SpaceX no pueden cubrir toda la región de demanda utilizando solo estaciones terrestres. Esto sucede porque, dados los campos de visión más grandes de los satélites, hay posiciones orbitales en las que un satélite tiene cierta población dentro de su campo de visión, aunque el ángulo de elevación a la

estación terrestre correspondiente es demasiado bajo para cerrar el enlace en condiciones atmosféricas que están presentes el 95 % del tiempo. Sin embargo, ni los sistemas de SpaceX ni Telesat necesitan lograr una cobertura del 100% de la región de demanda, ya que los enlaces intersatelite link se pueden usar para enrutar los datos de los satélites fuera de la región de cobertura a los satélites que realmente están dentro de la región de cobertura.

#### 4.4.- Comparativa de técnicas de protección

En este apartado final del análisis técnico se van a resumir los métodos analizados a lo largo del proyecto en una tabla comparativa para ver en qué casos utilizaríamos cada técnica.

Técnica de Protección del Enlace Feeder Óptico	Nubes	Niebla	Perturbaciones Atmosféricas	Aviones/Drones/HAPS
Diversidad Espacial	✓	✓	✓	✓
Diversidad de Frecuencia	✓	✓		✓
Diversidad de Polarización				✓
Diversidad Temporal			✓	✓
Diversidad del Site	✓	✓	✓	✓
Protocolos de Restauración	✓	✓	✓	✓
Algoritmos de Conmutación	✓	✓	✓	✓

Tabla 4.3: Comparativa de las técnicas de protección analizadas para distintas interferencias.

Para el bloqueo por presencia de una nube o niebla, la diversidad espacial o la diversidad del site son las más adecuada para evitar la rotura del enlace. Al tener múltiples rutas físicas o trayectorias para transmitir la señal, es posible redirigirla a través de una ruta alternativa cuando una ruta principal se vea bloqueada por nubes. También puede ser una opción la diversidad de frecuencia en el caso de la niebla, ya que al transmitir en diferentes frecuencias, es posible evitar o mitigar la atenuación causada por la presencia niebla en una determinada frecuencia, utilizando frecuencias alternativas con menor afectación.

Si las pérdidas se producen por turbulencias atmosféricas, se podría utilizar la diversidad temporal. Mediante el uso de técnicas de modulación y codificación temporal, es posible reducir los efectos adversos de la turbulencia atmosférica en la señal óptica, mejorando así la calidad y la robustez de la transmisión y mitigar efectos como el centelleo, que provoca desvanecimientos de la potencia óptica recibida.

Para evitar el bloqueo causado por aviones, drones o HAPS, además de la diversidad espacial o la diversidad del site, podría ser útil la diversidad de polarización. Utilizando diferentes polarizaciones de luz para transmitir múltiples señales y minimizar las interferencias provocadas por aviones en determinadas polarizaciones. En estos casos la rotura ocurre durante un pequeño intervalo temporal y en vez de aumentar el número de estaciones terrestres con el coste que conlleva, sería más adecuado utilizar los protocolos y algoritmos de restauración del enlace o la diversidad temporal.

**Hoja 63 de 73**

En general, aunque algunos de los métodos no están directamente relacionados con evitar el bloqueo, son importantes para mantener la disponibilidad de la conexión, y son utilizados para recuperar y redirigir el tráfico en caso de errores o interrupciones en los enlaces feeder y que incluso, en algunos casos, sea necesario combinar varias técnicas para lograr la mejor protección.

## 5. Conclusiones

En este último capítulo, se presentarán las conclusiones derivadas de la recopilación de las investigaciones existentes sobre el tema tratado y se establecerán las bases para futuros estudios en este campo.

### 5.1.- Conclusiones

El trabajo se ha centrado en el estudio del enlace feeder, haciendo hincapié en sus características principales y en aquellas situaciones que provocan su bloqueo, como los fenómenos atmosféricos o el paso de aviones o drones. Hasta ahora el enlace feeder RF era suficiente para los requerimientos de velocidad y transmisión de datos, pero el avance de las telecomunicaciones y los nuevos servicios requieren mayores capacidades que las bandas de radiofrecuencia no pueden facilitar. Esto lleva al planteamiento de la utilización de las bandas ópticas, las cuales además de tener una mayor capacidad de transmisión, tienen una menor latencia, inmunidad frente a interferencias electromagnéticas y menores restricciones regulatorias entre otras ventajas. El enlace feeder será sobre el que mayor tráfico se concentre, y por ello necesita protegerse.

El objetivo principal era aunar la información disponible en la literatura sobre las técnicas de protección del enlace feeder y la adaptación de estas a las comunicaciones ópticas. Se han analizado las principales interferencias que afectan a la rotura de este enlace en ópticas, como las nubes, la niebla o las perturbaciones atmosféricas.

Se ha recopilado información sobre los tipos de diversidad, concluyendo que la diversidad del site es adecuada tanto en RF como en ópticas para la protección del enlace feeder, siendo el método más visto en el estado del arte. También se han analizado los distintos protocolos implicados en comunicaciones ópticas y el uso de y algoritmos de conmutación que pueden ser usados también en ópticas para respaldar la comunicación.

Además, se han recogido las normas de regulación para los láser en el espacio europeo, según los tipos de laser y sus restricciones en emisión de potencia y exposición máxima permisible (EMP).

Finalmente, se han estudiado las modulaciones ópticas y se han representado algunos de sus parámetros más característicos, y se ha realizado un caso de uso para un sistema con diversidad del site, calculando el número de gateways necesarios para varias constelaciones conocidas de tipo GEO, MEO y LEO.



## 5.2.- Líneas futuras

Además de las conclusiones extraídas de este estudio, existen varias áreas de investigación prometedoras que pueden explorarse en el futuro. Estas líneas futuras ofrecen oportunidades para ampliar nuestro conocimiento y abordar aspectos no tratados en este trabajo. Algunas posibles direcciones incluyen:

1. Mejora de la tecnología de modulación y codificación: Investigar y desarrollar técnicas avanzadas de modulación y codificación que permitan una mayor robustez y resistencia a las interferencias en el enlace feeder. Técnicas de modulación adaptativa, corrección de errores más eficiente y algoritmos de procesamiento de señales más sofisticados.
2. Implementación de técnicas de cancelación de interferencias: Uso de antenas adaptativas y algoritmos de procesamiento de señales que permitan identificar y cancelar las interferencias no deseadas.
3. Mejora de la mitigación de la atenuación y la dispersión: La atenuación y la dispersión son desafíos importantes en los enlaces feeder ópticos de larga distancia. Futuras investigaciones podrían enfocarse en desarrollar y evaluar técnicas más efectivas para mitigar estos efectos, como el uso de amplificadores ópticos más eficientes, compensación de dispersión adaptativa y técnicas de preénfasis y posténfasis para compensar la distorsión de señal causada por la dispersión cromática en los enlaces de fibra óptica.
4. Investigación sobre el impacto de la turbulencia atmosférica en las comunicaciones ópticas: Analizar y mitigar los efectos de la turbulencia atmosférica, mediante técnicas como el uso de compensación adaptativa o sistemas de corrección de errores específicos para canales afectados por turbulencia.
5. Desarrollo de nuevos materiales y componentes ópticos: El avance en materiales y componentes ópticos puede impulsar significativamente el campo de las comunicaciones ópticas. Se pueden realizar investigaciones para desarrollar nuevos materiales con características ópticas mejoradas, como amplios rangos de transmisión o menor atenuación, así como para diseñar y optimizar componentes clave, como amplificadores ópticos, moduladores y fotodetectores.
6. Implementación de sistemas monitorización y detección de anomalías: Defensa activa para responder de manera automática y proactiva ante amenazas identificadas en el enlace feeder. Explotar técnicas de redireccionamiento dinámico de la señal, la adaptación de la potencia de transmisión o la reconfiguración de la configuración de antenas, con el objetivo de minimizar los efectos de los bloqueos.

**Hoja 66 de 73**

7. Desarrollo de sistemas híbridos RF y ópticos para el enlace feeder: investigaciones en integración eficiente de tecnologías RF y ópticas, el diseño de protocolos de conmutación dinámica entre los dos enlaces y la optimización de la infraestructura de red necesaria , proporcionando una solución adaptativa a las necesidades cambiantes de conectividad.
8. Profundizar técnicas de multiplexación espacial: futuras investigaciones en el campo de la multiplexación espacial pueden enfocarse en mejorar las técnicas existentes, como la multiplexación de haces de luz y el uso de modos espaciales, así como en explorar nuevas formas de combinar estas técnicas con otras tecnologías de transmisión óptica avanzadas.
9. Densidad espacial: el aumento inminente de satélites en órbita para mejorar la cobertura y la capacidad requerirá avances tecnológicos, gestión del espacio y cooperación internacional para garantizar una operación segura y eficiente en un entorno espacial cada vez más congestionado.
10. Estudio de la integración de tecnologías emergentes: Las comunicaciones ópticas pueden beneficiarse de la integración con tecnologías emergentes, como la computación cuántica, la inteligencia artificial y el IoT. Futuras investigaciones podrían explorar cómo estas tecnologías pueden combinarse y aprovecharse mutuamente para mejorar el rendimiento y la eficiencia de las comunicaciones ópticas.

En conclusión, estas líneas futuras son cruciales para asegurar la protección del enlace feeder y garantizar un servicio de comunicaciones satelitales seguro, confiable y eficiente en un entorno en constante evolución, con mucho tráfico y del que cada vez se espera más mejoras acorde a los nuevos servicios que surgirán.

# Bibliografía

- [1] Y. Abe, H. Tsuji, A. Miura, and Adach., “Frequency resource management on model predictive control for satcom system.,” 2018.
- [2] “Diagrama sistema de comunicaciones opticas.” <https://telecomunicaciones2.webnode.mx/unidad-6/a6-2-sistemas-de-comunicaciones-opticas-/>.
- [3] “Principios del laser.” <https://www.keyence.com.mx/ss/products/marketing/lasermarker/knowledge/principle.jsp>.
- [4] “Telemetro.” <https://www.telemetro.com/ciencia/actualidad/la-nasa-le-apuesta-al-laser-mejorar-dialogo-el-espacio-y-la-tierra-n5613937>.
- [5] C. M. W. J. P. Nicolas PERLOT, Thomas DREISCHER, “Optical geo feeder link design,” 2012.
- [6] R. L. Maksim Gavrilenko, Rifat Akbulatov, *Free-Space Laser Communication Terminal for LEO Constellation*. Rusia: IEEE, 2022.
- [7] Z. Hajjarian, J. Fadlullah, and M. Kavehrad, “Mimo free space optical communications in turbid and turbulent atmosphere (invited paper),” *Journal of Communication*, vol. 4, pp. 524–532, Sept. 2009.
- [8] J. Liang, A. U. Chaudhry, E. Erdogan, and H. Yanikomeroglu, *Link Budget Analysis for Free-Space Optical Satellite Networks*. Turkey: IEEE, 2022.
- [9] I. del Portillo, B. Cameron, and E. Crawley, “A comparison of low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband,” *Acta Astronautica*, vol. 159, 03 2019.
- [10] *NTP 261: Láseres: riesgos en su utilización*. CENTRO NACIONAL DE NUEVAS TECNOLOGÍAS, 2002.
- [11] “[https://www.ses.com/sites/default/files/2022-02/SES\\_03b\\_mPOWER\\_Factsheet\\_ES.pdf](https://www.ses.com/sites/default/files/2022-02/SES_03b_mPOWER_Factsheet_ES.pdf).”
- [12] “<http://latamsatelital.com/next-la-constelacion-nueva-generacion-iridium/>.”
- [13] “<https://www.inmarsatgov.com/capabilities/global-xpress/>.”
- [14] “Cceg-tfm ib-guia transversal sobre la cceg para estudiantado de tfx-eimt.pdf.” <https://www.uoc.edu/portal/es/index.html>.

- [15] C. T. Lizarraga, “Análisis de las necesidades de una smart city en el marco de un desarrollo sostenible,” in *Master’s Thesis, Universitat Oberta de Catalunya (UOC), Barcelona, Spain*, 2020.
- [16] V. Monzon Baeza, F. Ortiz, S. Herrero Garcia, and E. Lagunas, “Enhanced communications on satellite-based iot systems to support maritime transportation services,” *Sensors*, vol. 22, no. 17, 2022.
- [17] C. V. Miguelez, V. M. Baeza, R. Parada, and C. Monzo., “Guidelines for renewal and securitization of a critical infrastructure based on iot networks,” *Smart Cities*, vol. 6, no. 2, 2023.
- [18] “Economía new space.” <https://www.uoc.edu/portal/es/news/actualitat/2022/237-economia-new-space.html>.
- [19] “Inicio satcom ng.” [https://www.nationalgeographic.com.es/llegada-del-hombre-a-la-luna/carrera-espacial-paso-a-paso\\_14369](https://www.nationalgeographic.com.es/llegada-del-hombre-a-la-luna/carrera-espacial-paso-a-paso_14369).
- [20] “Inicio geo.” <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/928/4/T-ESPE-019391-4.pdf>.
- [21] N. Saeed, A. Elzanaty, H. Almorad, H. Dahrouj, T. Y. Al-Naffouri, and M.-S. Alouini, “Cubesat communications: Recent advances and future challenges,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 22, no. 3, pp. 1839–1862, 2020.
- [22] V. M. Baeza, E. Lagunas, H. Al-Hraishawi, and S. Chatzinotas, “An overview of channel models for ngso satellites,” in *2022 IEEE 96th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Fall)*, pp. 1–6, 2022.
- [23] “Constelaciones de satelites.” <https://eos.com/es/blog/constelaciones-de-satelites/>.
- [24] “Megaconstelaciones de satélites.” <https://www.technologyreview.es/s/11971/tr10-megaconstelaciones-de-satelites>.
- [25] F. Davoli, M. Marchese, F. Patrone, T. d. Cola, and M. Mongelli, “Smart gateway diversity strategies for q/v feeder links in sdn-satellite networks,” in *2020 Mediterranean Communication and Computer Networking Conference (MedComNet)*, pp. 1–7, 2020.
- [26] A. C. Casado, *DISEÑO DE UN ENLACE DE COMUNICACIONES ÓPTICAS CON MARTE*. Malaga: UMA, 2005.
- [27] H. Kaushal and G. Kaddoum, “Optical communication in space: Challenges and mitigation techniques,” *IEEE Access*, 2017.

- [28] A.-M. Arturo, S.-A. Joel, Domínguez-Retamoza, E. Antonio, M.-E. Ramón, N.-A. J. Manuel, M.-P. Jacobo, G.-M. Celso, and L.-L. J. Aarón, “Sistema de sincronización óptica espacial para comunicaciones ópticas en satélites pequeños operando en órbita baja,” 2020.
- [29] I. E. Paredes Jiménez, *Diseño de un sistema unidireccional de comunicaciones ópticas para uso entre una estación terrena y un CubeSat*. Ciudad de Mexico, Mexico: Instituto Politécnico Nacional, 2019.
- [30] “Sistemas de comunicación Ópticos.” [https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/76208/3/Sistemas%20de%20comunicaci%C3%B3n%20%C3%B3pticos\\_portada.pdf](https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/76208/3/Sistemas%20de%20comunicaci%C3%B3n%20%C3%B3pticos_portada.pdf).
- [31] “Laser-wikipedia.” <https://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%A1ser>.
- [32] *NTP 654: Láseres: nueva clasificación del riesgo*. CENTRO NACIONAL DE NUEVAS TECNOLOGÍAS, 2002.
- [33] IEC, *Safety of laser products - Part 10: Application guidelines and explanatory notes to IEC 60825-1*. IEC Technical Report TR 60825-10:, 2002.
- [34] *Seguridad de los productos láser. Parte 1: Clasificación del equipo, requisitos y guía de seguridad*». UNE, 2002.
- [35] *SAFETY OF LASER PRODUCTS*. IEC, 2017.
- [36] “Conexión laser starlink.” <https://www.xataka.com/espacio/verdadera-razon-que-conexion-laser-satelites-starlink-importante-no-latencia>.
- [37] *Reglamento de Radiocomunicaciones*. ITU.
- [38] J. Amos. <https://www.bbc.com/news/science-environment-12065466>, 2010.
- [39] B. S. Robinson, D. M. Boroson, D. A. Burianek, and D. V. Murphy, “Overview of the lunar laser communications demonstration,” 2011.
- [40] R. Lange and B. Smutny, “Homodyne bpsk based optical inter-satellite communication links,” *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 03 2007.
- [41] V. e. DIN e.V., *Optische Strahlungssicherheit und Laser 2, DIN-VDE-Taschenbücher Band 526. 2*. 2010.
- [42] I. Ahmad, K. D. Nguyen, and N. Letzepis, “Performance analysis of high throughput satellite systems with optical feeder links,” 2017.

- [43] S. G. Lambert and W. L. Casey, *Laser communications in space / Stephen G. Lambert and William L. Casey*. Artech House Boston, 1995.
- [44] N. E. Giralt, “Análisis de modelos de atenuación por lluvia en enlaces terrestres aplicados a enlaces espaciales,” in *Master’s Thesis, Universitat Oberta de Catalunya (UOC), Barcelona, Spain*, January 2023.
- [45] M. Awan, E. Leitgeb, B. Hillbrand, F. Nadeem, and M. Khan, “Cloud attenuations for free-space optical links,” pp. 274–278, 2009.
- [46] A. C. Nava, *Estudio teórico-experimental de la turbulencia óptica en comunicaciones ópticas coherentes inalámbricas*. Ensenada, Baja California, Mexico: CICESE, 2012.
- [47] A. C. Nava, *Estudio teórico-experimental de la turbulencia óptica en comunicaciones ópticas coherentes inalámbricas*. Ensenada, Baja California, Mexico: CICESE, 2012.
- [48] E. Erdogan, I. Altunbas, G. K. Kurt, M. Bellemare, G. Lamontagne, and H. Yanikomeroglu, “Site diversity in downlink optical satellite networks through ground station selection,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 31179–31190, 2021.
- [49] Z. Ghassemlooy, W. Popoola, and S. Rajbhandari, “Optical wireless communications system and channel modelling with matlab,” 2019.
- [50] B. Mathason, M. Albert, D. Engin, H. Cao, K. Petrillo, J. Hwang, K. Le, K. Puffenberger, S. Litvinovitch, R. Utano, M. Storm, M. Shelton, A. Pulkkinen, and E. Summerlin, “Ssc19-p3-27 advances in cubesat laser communications transceiver,” 09 2019.
- [51] A. Jurado-Navas and A. Garcia-Zambrana, A. andPuerta-Notario, *Impacto de la Coherencia Atmosférica en Comunicaciones Ópticas en Espacio Libre*. Malaga: UMA, 2016.
- [52] L. Andrews, R. Philips, and C. Hopen, *Laser Beam Scintillation With Applications*. 01 2001.
- [53] V. M. Baeza and M. A. Marban, “High altitude platform stations aided cloud-computing solution for rural-environment iot applications,” in *Computer Networks and Communications*, vol. 1, p. 91–104, 2022.
- [54] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge University, 2005.
- [55] W. C. Jakes and D. C. Cox, *Microwave mobile communications*. Wiley-IEEE press, 1994.

- [56] N. Le Gallou, M. Aloisio, P. Angeletti, E. Re, A. Ginesi, R. De Gaudenzi, D. Petrolati, C. Ernst, J.-C. Angevain, N. Fonseca, C. Mangenot, L. Rolo, G. Toso, S. Lascar, R. Halm, F. Garat, K. Goodey, D. Mignolo, and D. Schmitt, "Beyond ka-band: Leveraging q/v band to ensure the provision and future growth of broadband satellite communications," in *IET Seminar on Beyond Ka-Band: Meeting the Communication Bandwidth Requirements of the Future*, pp. 1–58, 2011.
- [57] A. Kyrgiazos, B. Evans, P. Thompson, and N. Jeannin, *Gateway Diversity scheme for a Future Broadband Satellite System*. United Kingdom, France: IEEE, 2012.
- [58] <https://www.urbe.edu/info-consultas/web-profesor/12697883/articulos/Redes%20Informaticas/Redes%20Opticas.pdf>.
- [59] [https://es.wikipedia.org/wiki/Red\\_%C3%93ptica\\_Sincrona\\_SONET](https://es.wikipedia.org/wiki/Red_%C3%93ptica_Sincrona_SONET).
- [60] G. J. Andrade, *Estudio de la tecnología de conmutación óptica por ráfagas-obs y análisis de migración de redes ópticas a esta tecnología*. Ecuador: Escuela Politécnica del Ejército, 2011.
- [61] [https://es.wikipedia.org/wiki/Jerarqu%C3%ADa\\_digital\\_s%C3%ADncrona](https://es.wikipedia.org/wiki/Jerarqu%C3%ADa_digital_s%C3%ADncrona).
- [62] <https://www.ionos.es/digitalguide/servidores/know-how/ethernet-ieee-8023/>.
- [63] [https://es.wikipedia.org/wiki/Historia\\_de\\_Internet](https://es.wikipedia.org/wiki/Historia_de_Internet).
- [64] S. Davies, "The fundamentals of ethernet/ip," *Computing Control Engineering Journal*, vol. 18, 02 2007.
- [65] "Nasa." <https://www.ramonmillan.com/tutoriales/gmpls.php>.
- [66] G. E. T. D. Conti, *Arquitectura de las redes ópticas de conmutación automática*. Mexico: Instituto Politécnico Nacional, 2015.
- [67] C. Fuchs and F. Moll, "Ground station network optimization for space-to-ground optical communication links," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 7, p. 1148, 12 2015.
- [68] M. Sanchez Net, E. Crawley, and B. Cameron, "Methods for estimating the availability of optical networks," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 8, pp. 800–812, 10 2016.
- [69] N. K. Lyras, C. N. Efrem, C. I. Kourogorgas, and A. D. Panagopoulos, "Optimum monthly based selection of ground stations for optical satellite networks," *IEEE Communications Letters*, vol. 22, no. 6, pp. 1192–1195, 2018.

- [70] S. Gong, H. Shen, K. Zhao, R. Wang, X. Zhang, T. De Cola, and J. A. Fraier, “Network availability maximization for free-space optical satellite communications,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 9, no. 3, pp. 411–415, 2020.
- [71] P. Gopal, V. Jain, and S. Kar, “Performance improvement of fso satellite downlink using aperture averaging and receiver spatial diversity,” *IET Optoelectronics*, vol. 10, 03 2016.
- [72] J. Ma, K. Li, L. Tan, S. Yu, and Y. Cao, “Performance analysis of satellite-to-ground downlink coherent optical communications with spatial diversity over gamma-gamma atmospheric turbulence,” *Applied optics*, vol. 54, pp. 7575–7585, 09 2015.
- [73] S. Poulenard, M. Crosnier, and A. Rissons, “Ground segment design for broadband geostationary satellite with optical feeder link,” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 7, 04 2015.
- [74] V. Monzon Baeza, F. Ortiz, E. Lagunas, T. Salih Abdu, and S. Chatzinotas, “Multi-criteria ground segment dimensioning for non-geostationary satellite constellations,” in *2023 European Communications and Networks Conference*, pp. 1–6, 2023.
- [75] V. Monzon Baeza, F. Ortiz, E. Lagunas, T. Salih Abdu, and S. Chatzinotas, “Gateway station geographical planning for emerging non-geostationary satellites constellations,” in *IEEE Network Magazine*, pp. 1–5, 2023.
- [76] G. Velusamy and R. Lent, “Smart site diversity for a high throughput satellite system with software-defined networking and a virtual network function,” *Future Internet*, vol. 12, no. 12, 2020.
- [77] “Recomendación g.8032/y.1344 (2020) corrigendum 1 (02/22).”
- [78] [https://en.wikipedia.org/wiki/0n%E2%80%93off\\_keying](https://en.wikipedia.org/wiki/0n%E2%80%93off_keying).
- [79] <https://medium.com/modulaciones-de-pulsos-muestreo-pam-ppm-pcm-y/modulaciones-de-pulsos-ppm-558c91689e7>.
- [80] “<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20130000581/downloads/20130000581.pdf>.”
- [81] J. M. K. Da-shan Shiu, “Differential pulse-position modulation for power-efficient optical communication,” 1999.
- [82] Z. Ghassemlooy, A. Hayes, N. Seed, and E. Kaluarachchi, “Digital pulse interval modulation for optical communications,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 36, no. 12, pp. 95–99, 1998.



- [83] N. Aldibbiat, “Dual header-pulse interval modulation (dh-pim) for optical communication systems,” 01 2000.
- [84] N. Aldibbiat and R. McLaughlin, “Performance of dual header-pulse interval modulation (dh-pim) for optical wireless communication systems,” *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 12 2000.
- [85] R. M. N. M. ALDIBBIAT, Z. GHASSEMLOOY, “The characteristics of dual header pulse interval modulation(dh-pim) in indoor optical wireless systems,” *School of Electrical Electronics Engineering, Nanyang Technological University*.
- [86] “[https://es.wikipedia.org/wiki/Modulaci%C3%B3n\\_por\\_desplazamiento\\_de\\_fase](https://es.wikipedia.org/wiki/Modulaci%C3%B3n_por_desplazamiento_de_fase).”
- [87] V. M. Baeza, A. G. Armada, W. Zhang, M. El-Hajjar, and L. Hanzo, “A noncoherent multiuser large-scale simo system relying on m-ary dpsk and bicm-id,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 2, pp. 1809–1814, 2018.
- [88] V. M. Baeza and A. G. Armada, “Orthogonal versus non-orthogonal multiplexing in non-coherent massive mimo systems based on dpsk,” in *2021 Joint European Conference on Networks and Communications 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*, pp. 101–105, 2021.
- [89] V. M. Baeza and A. G. Armada, “User grouping for non-coherent dpsk massive simo with heterogeneous propagation conditions,” in *2021 Global Congress on Electrical Engineering (GC-ElecEng)*, pp. 26–30, 2021.
- [90] V. M. Baeza and A. G. Armada, “Performance and complexity tradeoffs of several constellations for non coherent massive mimo,” in *2019 22nd International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, pp. 1–6, 2019.
- [91] V. M. Baeza and A. G. Armada, “Analysis of the performance of a non-coherent large scale simo system based on m-dpsk under rician fading,” in *2017 25th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, pp. 618–622, 2017.
- [92] M. Guo, B. Luo, Y. Ren, S. Zhao, and A. Dang, “Influence of beam wander on uplink of ground-to-satellite laser communication and optimization for transmitter beam radius,” p. 1977–1979, 2010.
- [93] H. Lim, J. Park, M. Choi, C. Choi, J. Choi, , and J. Kimv, “Performance analysis of dpsk optical communication for leo-to-ground relay link via a geo satellite,” p. 11–18, 2020.